

Title	岩盤斜面崩壊および落石問題への数値解析手法の適用性に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	島内, 哲哉
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2008-03-24
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k13799
Right	許諾条件により本文は2008-09-24に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

岩盤斜面崩壊および落石問題への
数値解析手法の適用性に関する研究

平成 20 年 3 月

島 内 哲 哉

目次

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	2

第2章 岩盤崩壊および落石問題の調査と評価の現状

2.1 岩盤崩壊の実態	6
2.1.1 岩盤崩壊の規模と形態	6
2.1.2 岩盤崩壊の規模と対応の考え方	12
2.2 岩盤崩壊の発生要因	14
2.2.1 岩盤崩壊発生の素因	15
2.2.2 岩盤崩壊発生の誘因	25
2.2.3 岩盤崩壊の発生要因のまとめ	29
2.3 岩盤崩壊の調査手法とモデル化	31
2.3.1 岩盤斜面の調査法	31
2.3.2 不連続面の調査法	38
2.3.3 岩盤崩壊のモデル化	43
2.3.4 岩盤崩壊の危険箇所予測のための調査事例	46
2.4 岩盤崩壊および落石の危険度評価法の現状	49
2.5 2章のまとめ	55

第3章 岩盤崩壊および落石問題への数値解析手法の適用に関する研究

3.1 岩盤崩壊問題に適用される解析手法の種類	61
3.1.1 限界平衡法	61
3.1.2 数値解析法	62
3.1.3 質点解析法	64
3.1.4 岩盤崩壊メカニズム解析のための解析法	66
3.2 不連続変形法(DDA)の基本原理	67
3.2.1 DDAの原理	68
3.2.2 ブロックの変位と変形	68
3.2.3 エネルギー最小化原理と全体剛性方程式	70
3.2.4 全体剛性方程式中の各サブマトリックス	71
3.2.5 ブロック間の接触	75
3.2.6 接触時の繰り返し計算	80
3.3 解析に用いる物性値の取得法	81
3.3.1 岩盤の変形・強度特性と不連続面の影響	81

3.3.2	不連続面の変形・強度特性	84
3.3.3	落下岩塊の解析に用いる入力値	89
3.3.4	物性値のまとめ	92
3.4	不連続変形法の岩盤斜面崩壊への適用例と課題	93
3.4.1	適用事例にみる移動体のモデル化	93
3.4.2	事例解析を通してみるモデル作成の留意点	95
3.4.3	3.4 のまとめ	100
3.5	不連続変形法の岩盤崩落および落石問題への適用と課題	101
3.5.1	落石解析に用いられる入力値	101
3.5.2	DDA の岩盤崩落、落石問題への適用事例	101
3.5.3	岩盤崩落シミュレーションに用いる速度エネルギー比の性質	104
3.5.4	落石のモデル形状が反発現象に与える影響	108
3.5.5	落石のモデル形状がシミュレーション結果に与える影響	112
3.5.6	3.5 のまとめ	114
3.6	三次元岩盤崩壊モデルの作成と活用への試み	115
3.6.1	3d-DDA のための三次元岩盤崩壊モデルの作成法	115
3.6.2	岩盤崩壊への 3d-DDA の適用事例	120
3.7	3 章のまとめ	125

第 4 章 落石解析に用いる速度比評価のための実験

4.1	既往実験にみるこれまでの研究	131
4.1.1	落石の運動区分と用語の定義	131
4.1.2	既往落石実験にみるこれまでの研究	133
4.1.3	落石実験から得られる運動の遷移条件	141
4.1.4	落石衝突時の諸常数の特性	144
4.1.5	速度比と速度エネルギー比の法線方向速度依存性について	145
4.2	現場落石実験	148
4.2.1	現場落石実験の目的と着目点	148
4.2.2	現場落石実験の手順と手法	149
4.2.3	実験現場の概要	155
4.2.4	現場(a) トンネル上部危険岩塊除去工事での観察と計測結果	156
4.2.5	現場(b) 道路脇の危険岩塊除去工事での観察と計測結果	161
4.2.6	現場(c) 採石場での観察と計測結果	167
4.2.7	速度比の入射角度と法線方向入射速度との関係	172
4.2.8	斜面を落下する岩塊のエネルギーの変化	176
4.2.9	現場落石実験結果とまとめ	180

4.3 室内落石実験	182
4.3.1 室内実験飲む目的と着目点	182
4.3.2 傾斜衝突実験	183
4.3.3 速度比の入射角度と法線方向入射速度との関係	186
4.3.4 法線方向速度比(R_n)と速度比(R_v)の法線方向入射速度に対する性質	193
4.3.5 室内落石実験結果のまとめ	195
4.4 実験結果に基づく速度比の特性と評価の方法	197
4.4.1 現場実験と室内実験結果の違い	197
4.4.2 法線方向速度比(R_n)と法線方向入射速度との関係	198
4.4.3 スケールファクター(SF 曲線法)を用いた法線方向入射速度依存性の評価	199
4.4.4 室内実験結果を用いた法線方向速度比の SF 曲線法の評価	200
4.4.5 速度比(R_v)の法線方向入射速度に対する依存性の定式化	203
4.4.6 速度比(R_v)を用いた SF 曲線の実斜面への適用性の検討	205
4.5 4章のまとめ	211

第5章 衝突問題における DDA の内部パラメータ設定法

5.1 DDA の内部パラメータに潜む問題	219
5.1.1 DDA の基礎理論に潜む数値解析ダンピング	220
5.1.2 解の安定性を左右する内部パラメータ	221
5.2 三次元剛体球要素不連続変形法(DDAball)について	224
5.2.1 三次元 DDAball の未知数と剛体球要素の変位	224
5.2.2 平面要素と剛体球要素の接触判定	225
5.3 DDAball で用いられるニューマーク法の特性	228
5.4 DDA の接触機構と Δt , ペナルティバネ, 変位比の性質	231
5.4.1 DDAball におけるプログラムの流れ	231
5.4.2 DDAball における接触判定	232
5.4.3 DDAball におけるペナルティバネと時間刻み	234
5.5 パラメトリックスタディにみるペナルティバネの傾斜反発特性	239
5.5.1 時間刻みの決定法	240
5.5.2 ペナルティバネの性質と決定法	240
5.5.3 衝突速度のペナルティバネへの影響	241
5.5.4 落石質量とペナルティバネとの関係	244
5.5.5 傾斜衝突に与えるペナルティバネの影響	245
5.5.6 許容変位比の影響	250
5.5.7 接触時間と計算回数との関係	251
5.6 第5章のまとめと内部パラメータの決定法	254

6 章	DDA の落石解析への適用性に関する研究	
6.1	速度比の法線方向入射速度依存効果式の導入	259
6.1.1	DDAball への SF 曲線法の導入	259
6.1.2	SF 曲線における $Rv(s)$ と K の役割	260
6.2	室内実験結果の再現解析にみる SF 曲線法の効果	262
6.3	SF 曲線法による現場実験結果の再現解析	265
6.3.1	現場(a)への適用事例	265
6.3.2	現場(c)への適用事例	269
6.4	公表されている実験現場への適用事例	273
6.4.1	菌原現場への適用事例	273
6.4.2	高松実験への適用事例	278
6.5	ばらつきの導入	283
6.5.1	DDAball を用いた斜面変化角によるばらつきの考慮	284
6.5.2	岩塊形状が反発時の軌跡のばらつきに与える影響	288
6.6	まとめと今後の課題	291
7 章	研究成果に基づく提案と今後の課題	
7.1	岩盤崩壊調査と落石防災問題への対応の高度化	295
7.2	落石シミュレーションへの数値解析の適用	298
8 章	本研究のまとめ	305
	研究実績	309
	謝辞	

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的

層雲峡(1987), 越前海岸(1989), 豊浜トンネル(1996), 第二白糸トンネル(1998), 北陽斜面崩壊(2001), 襟裳岩盤崩壊(2004)と, ここ 10 数年あまりの間に大規模な岩盤崩壊がいくつか発生した。また, 2004 年に発生した中越地震でも多くの岩盤崩壊が発生した。このように重大な災害に至らないまでも, 小規模の岩盤崩壊や落石はしばしば発生し, その被害発生場所は全国の山岳地帯に及んでいる。国土の 3/4 が山岳地を占め, 構造運動や火山活動の影響を受けた脆弱な地盤が広く分布する我が国では, 岩盤崩壊や落石は, 至るところでみられる地質現象である。

平成 8 年～9 年に, 全国一斉道路防災点検が行われ, 国交省直轄国道では 64,000 箇所がリストアップされた。その内訳は, 要対策箇所が 7,500 箇所, カルテ対応箇所が 15,000 箇所であった。一方, その後の平成 8 年度～平成 16 年年度の間で, 477 箇所が災害が発生しており, その内訳は表 1.1 に示すように落石・崩壊が圧倒的に多くを占め, 数こそ少ないものの岩盤崩壊も, 地すべりより多い結果となっている。

表 1.1 平成 8 年度～平成 16 年度の間に発生した災害の内訳[1]

点検対象項目	要対策	カルテ対応	対策不要	対象外	合計
落石・崩壊	63	86	32	185	366
岩盤崩壊	7	0	0	4	11
地すべり	0	2	0	4	6
土石流	1	1	0	19	21
盛土	4	6	11	44	65
擁壁	2	3	1	2	8
合計	77	98	44	258	477

本表によれば, 477 箇所のうち平成 8 年の防災点検で対象となっていたのは 219 件であり, 残りの 258 件が点検対象外である。また, 点検対象に含まれていた 219 件中のなかには対策不要と判定されたものが 44 件もあるが, そのうちの 32 件が落石・崩壊である。また, 点検対象外の災害では, 185 件もの落石・崩壊がある点も目につく。このような落石・崩壊災害の発生原因には, 災害箇所, 崩壊形態, 崩壊規模などが想定外といった理由が多くあげられており, 現在は検出範囲や検出方法の問題がクローズアップされている[2]。しかしこのことは, 熟練した技術者でも岩盤斜面中の危険箇所を検出し評価することが難しいことを表している。

一方, 近年では, 写真やレーザーなどを用いた非接触測量法や衛星写真などのデジタル情報の発達と普及により, これまで近づくことすら困難だった急崖部の調査が可能になり, 危険部位検出精度の向上も期待されている。しかしながら, 評価段階になると, 数値解析などの合理的手法の導入が期待されているものの, その具体的な利用法や着眼点や検出手

順は整備されていないこともあり、現在でも経験的手法が中心である。

被災予測のための評価法についても同様である。従来の落石対策便覧などの経験的方法に代えて、より現実的な岩塊や地形形状をモデルに反映可能な数値解析法の実用化が期待されているが、現段階では、前述と同様の問題を抱えており、この点は常に指摘されるところである[3][4]。

本研究では、このような岩盤斜面が抱える問題のうち、その発生頻度が多く予測の難しい岩盤崩落、落石問題を中心に、前半では発生源の評価に関する問題と数値解析を崩落問題に適用する際の問題点について指摘し、後半ではこの指摘をもとに、被災予測に用いる物性値の評価のための研究を行った。

1.2 本研究の構成

図 1.1 に、本研究のフローチャートを示す。

第 1 章、序論では、本研究の背景となった岩盤斜面を発生源とする災害の特徴と課題について述べ、本研究の目的を述べる。

第 2 章では、岩盤斜面で発生する崩壊および落石問題の調査と評価の現状について述べる。岩盤の崩壊や落石災害の調査では、まずその危険箇所、崩壊発生箇所を特定し、崩壊形態を予測することが重要である。そのためには、危険な岩盤斜面の地形的、地質的特徴を把握し、岩盤崩壊特有の着眼点と調査手法を確立する必要がある。本章では、大規模なものから小規模なものまで幅広く存在する岩盤崩壊のさまざまなタイプを紹介し、その発生にかかわる素因と誘因、規模と発生頻度などの特徴について述べる。また、調査に際しての着眼点(地形、不連続面、地質)を整理し、岩盤崩壊の調査では調査地周辺の旧崩壊地形にも注意が必要であることを述べる。一方、調査結果は、発生源での発生危険度と、被災想定 of 2 つに関する総合評価でまとめられる。いずれの評価も、現段階では経験法が中心であるが、計測による変位監視の困難な規模の大～中規模崩壊では、頻度は低い分発生危険度の予測そのものに、対する小規模崩壊や落石は、一つ一つは小さいが、発生頻度が高く対象地域も広範囲に及ぶという特徴がある。本研究では主に後者の、被災想定のための予測法に数値解析を導入し、評価の定量化を計ることを目的としている。

第 3 章では、前半で岩盤崩壊に適用される解析手法の種類を紹介する。岩盤崩落、落石現象の被災予測解析には、現在、主に質点解析法が用いられているが、岩塊の形状が考慮できず、対象規模も数 t までに限られるなど制約も多く、近年ではこれに変わって不連続体解析法の適用が増えている。本章では、その代表的解析法の一つである不連続変形法 (DDA) の理論的背景を説明する。また、数値解析を行う際の入力値の調査、試験法、なか

でも崩壊後の岩塊の挙動予測に不可欠な、粘性係数や速度エネルギー比などについて説明する。

一方、数値解析の実用化では、崩壊モデルの作成と現場の条件に応じた適切な入力値の設定という 2 つが重要である。第 3 章後半では、DDA の適用事例報告をもとに、現状の課題を説明する。また、4 章で述べる現場実験結果の再現解析に DDA を適用した予備検討事例をもとに、モデルの作成法や入力物性値の抱える問題点を整理する。

なお、3 章の最後に、三次元の岩盤崩壊モデルの作成法と解析事例を示し、三次元解析の適用性について検討する。ここで説明する三次元モデルの作成法は、本研究後半の三次元落石解析において、地形及び落石の解析モデル作成に援用される。

第 4 章では、最初に、我が国での既往落石実験結果をまとめ、衝突時の各種係数の性質と、法線方向入射速度に対する依存性の問題について述べる。ついで、第 3 章での指摘をもとに、速度比(R_v)の性質を調べる目的で実施した現場実験結果についてまとめる。なお、本計測では、ビデオ画像とコンピュータグラフィックス画像とを合成し、岩塊の動きを追跡する方法を用いており、これについても説明する。一方、現場実験結果のみでは岩塊の形状や衝突斜面の起伏や衝突時の凹み(圧縮塑性変形)などの影響が大きく、値がばらつくためその変動の原因を詳細に把握することが難しい。このため室内実験による追試を行い、その結果を現場実験と対比することで各種速度比の性質の違いを明らかにする。

本章の最後では、これらの現場実験と室内実験から得られた結果から明らかとなった反発係数や速度比の法線方向入射速度依存性を、DDA に適用するための方法について検討し、提案する。

第 5 章では、落石問題に数値解析を適用する際に常に指摘される[2][3][4]、時間刻み、ペナルティバネなどの内部パラメータの設定法について述べる。近年、数値解析の動的問題では、これらの内部パラメータの設定の如何が、大きな数値減衰につながるとの指摘がある。落石や岩塊の崩落現象解析は、エネルギー損失過程の評価であることから、想定外の数値減衰は避けなければならない。本章では、本研究で用いる三次元剛体球不連続変形法(DDAball)について概説し、内部パラメータの設定の速度と角度に対する性質と、衝突時に生じる減衰影響を最小限に留める設定法について述べ、DDAball を落石問題に適用する際の内部パラメータの設定法を提案する。

第 6 章では、4 章で提案した速度依存性の関係式を DDAball に導入し、室内および現場実験結果の再現解析を行う。さらに、公表されている他の現場実験への適用を通して、その一般性、有効性を検証する。

また、本章の最後では、落石シミュレーションにおいてしばしば指摘されるばらつきの問題に対する、DDAball による今後の対応の方向について述べる。

第7章では、2章、3章での研究成果をもとに、崩落、落石発生源となる岩盤斜面の調査法の高度化について提案する。また、4章、5章での成果をもとに、現在は質点解析中心の落石シミュレーションのフローに、数値解析法である DDAball の適用を提案する。

第8章は、本研究のまとめである。

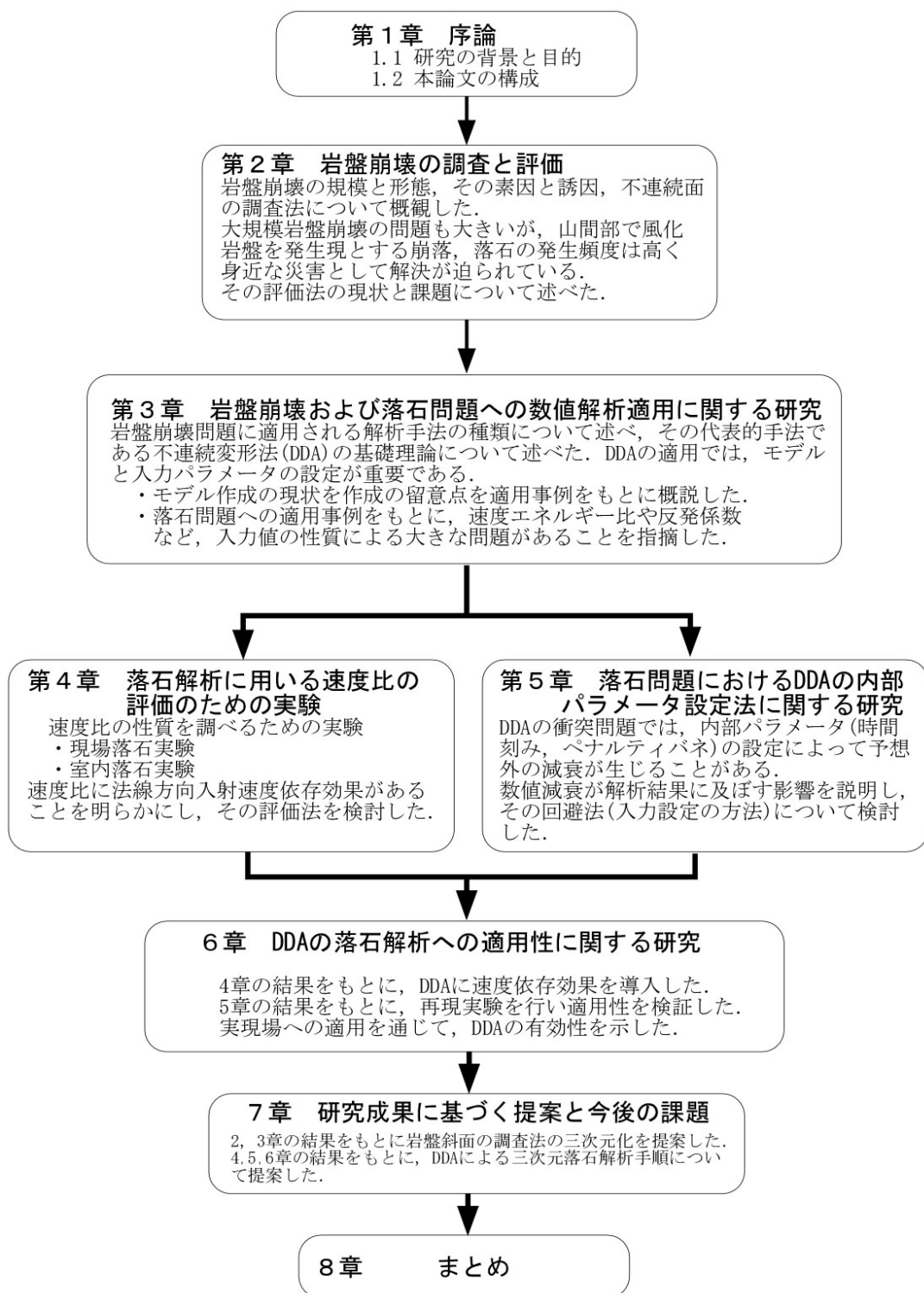


図 1.1 本研究のフローチャート

参考文献

- [1](独)土木研究所：GIS を活用した道路斜面のリスク評価に関する共同研究報告書，道路斜面ハザードマップ作成要領，2004.
- [2](独)土木研究所：GIS を利用した道路斜面のリスク評価に関する共同研究報告書，道路防災マップ作成要領(案)，2006.
- [3]日本道路協会:落石対策便覧に関する参考資料 - 落石シミュレーション手法の調査研究資料-,2002
- [4]松尾修：落石シミュレーションの現状と今後の課題，第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.267-273, 2002.

第2章 岩盤崩壊の調査と評価

2. 1 岩盤崩壊の実態

2.1.1 岩盤崩壊の規模と形態

岩盤斜面における崩壊現象は、地すべりのような緩慢な変動に比べて、前兆現象に乏しくかつ動きが急であることが特徴である。その崩壊形態は、急崖やオーバーハングなどの地形上の特徴と、地山に内在する不連続面との関係から想定される崩壊時の運動様式によって、崩落、滑動、トップリング、バックリングなどに分類されている(図 2.1.1)[2]。

滑動型は、小規模なものから巨大崩壊にまで広くみられ、すべり面となる面の傾斜が緩い場合には地すべりとして扱われることも多い。また、小規模な岩塊が急崖上部から落下するような場合に滑落とも呼ばれることもある。滑動の形態は、崩壊面の形状によって、平面破壊、くさび破壊、円弧破壊などに細分される。平面破壊やくさび破壊は不連続面に規制された岩塊(ブロック)崩壊であるが、円弧破壊は、風化による土砂化の進んだ軟岩でしばしば見られる。一方、トップリングは、柱状節理のようにほぼ垂直から受け盤の割れ目が発達する急崖やオーバーハングを伴う急崖において、岩体下部を支点として頭部が倒れるように回転しながら破壊する現象をいい、滑動タイプに比べると一般的に小～中規模である。破壊様式として、複数の小規模岩塊が折り重なるようにして倒れ込む場合、全体あるいは 2～3 個のブロックが崩壊するのかわりにたわみ性トップリング、ブロックトップリングに区分されることもある。バックリングは、長柱状の岩塊の中間部が折れて前にはらみだし、最終的に折れて崩壊するタイプであり、層雲峡(北海道)で報告されているが、いまのところその報告は少ない。

これらの崩壊時の動きは、滑動形態をとるもの、特に崩壊面の傾斜が緩い場合には動きが緩慢なことが多いが、急崖部で発生する崩落や転倒などは、前兆がほとんど検出されないまま突然発生するため、時に甚大な事故につながる。

写真-2.1.1～写真-2.1.4 は、近年、我が国で発生した代表的な岩盤崩壊の例である。**写真-1** は、第二白糸トンネル(1997)の崩壊例であり、傾いた岩頭の高さは 130m に達する[8]。**写真-2** は、豊浜トンネルで崩落岩塊の高さは 55m である[9]。2つの写真は、ほぼ同じスケールで見えるように縮尺を合わせている。第二白糸トンネルは、岩体前面の脚部が崩れて全体が前に転倒するタイプの崩壊(トップリング)であり、豊浜トンネルは、崖面上の岩塊がはがれて落下したもので崩落と呼ばれている。**写真-3** は層雲峡・天城岩(1987)の崩壊で、高さは写真中の枠の範囲だけで 120m に及ぶ[6]。崩落ないしトップリングと見られるが、下部斜面に倒壊した岩塊の一部は落下後に跳ねて対岸の国道にまで及んでいる。一方、**写真-4** は、越前玉川の崩壊で、ロックシェッド上部の岩塊の高さは 25m である[10]。これらの岩盤崩壊は、いずれも高さ 100～200m を超える海蝕崖や V 字谷の浸食崖で発生しており、きわめて長期にわたる浸食や風化による地形後退の過程で発生するものと考えられている。

岩盤斜面の調査と対策

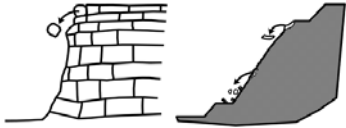
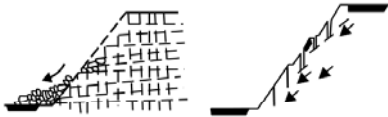
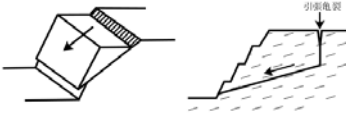
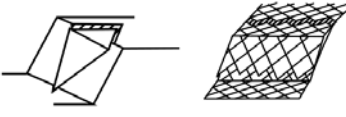





崩壊形態		破 壊 モ デ ル	対象地質	特 徴
崩壊現象	落 石			風化や浸食作用を受けて緩んだ斜面上の岩石が岩盤から分離して、落下する現象。斜面崩壊の前兆現象を示す場合が多い。
	ブロック破壊		亀裂や節理の発達した硬岩	最も弱いブロックが最初に破壊し、それに続いて他のブロックが破壊し、最後に岩盤全体が破壊する現象。
すべり等による崩壊	平面すべり破壊		流れ盤の場合(軟岩、硬岩)	節理、断層、片理等の連続的な構造的弱面、断層のような大きな地質的不連続面に沿って破壊する現象。
	くさび破壊		不連続面の発達した岩盤斜面	交差した2つの不連続面で囲まれた岩盤がせん断すべり崩壊を起こす現象。複数のくさび崩壊が連続する場合が多い。
	円弧すべり破壊		土砂、軟弱な岩盤、亀裂が無数に発達した岩盤	斜面が円弧に沿って回転崩壊を行う現象。
	複合すべり破壊		土砂、軟岩、硬岩、風化岩すべり、岩盤地すべり	円弧すべり崩壊と平面すべり崩壊などいくつかの崩壊形態が複合して発生する現象。一般に崩壊規模が大きく、いわゆる地すべり崩壊形態が多い。
トップリング崩壊	たわみ性トップリング破壊		節理の傾斜が受け盤で比較的穏やかな、しかも軟質な板状岩盤	節理によって分離した岩盤が重力によって全体的に斜面側にたわんで、ゆっくりと崩壊していく現象。
	ブロックトップリング破壊		節理の傾向が、受け盤で急斜面でしかも硬質の板状または柱状の岩盤	節理によって分離した岩盤が重力によって斜面側にたわみ、引張破壊を起こして、上部の岩石がブロック状(岩塊)になって崩壊する現象。
バックリング破壊			節理や層理がほぼ垂直に発達している岩盤	板状または粒状に分離した岩体が、自重によって、亀裂や劣化の箇所で座屈し、折れ曲がるように全体的に崩壊する現象。

図-2.1.1 岩盤崩壊の代表的な崩壊形態

いずれも、1/25000 クラスの地形図や 1/10000 クラスの空中写真など、いわゆるメソスケールレベルで存在を確認することができる。ただし、地形図では崖マークで示され、空中写真では地形的な特徴は読みとれるもののオーバーハングの存在まではわからない。

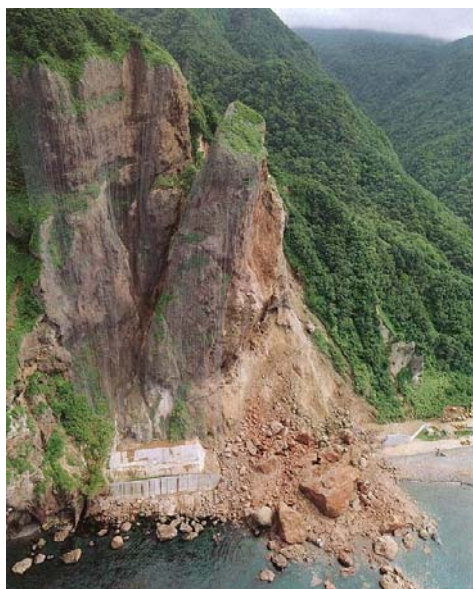


写真-2.1.1 第二白糸トンネル坑口(1997)
傾いた岩塊の規模は高さ 130m
幅 70m, 奥行き 20m, 体積 42000m³.



写真-2.1.2 豊浜トンネル坑口(1996)
崩落岩塊の規模は高さ 55m, 幅 30m,
奥行き 13m, 体積 7200m³.



写真-2.1.3 層雲峡(天城岩)(1987)
崩壊高さ 120m, 最大幅 15m, 奥
行き 4~5m 崩落土量(11,200m³)

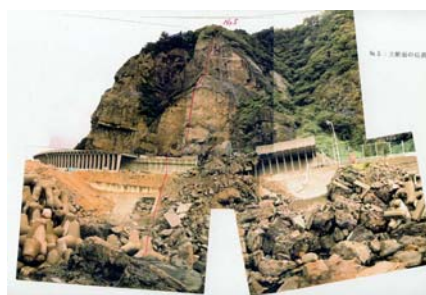


写真-2.1.4 越前海岸(玉川)(1989)
崩壊高さ 25m, 最大幅 30m,
崩落土量(1100m³)



写真-2.1.5 頁岩で発生した滑動崩壊. 右が崩壊前. 左は崩壊後.



写真-2.1.6 海岸沿いの高さ 20～30m の崖面で発生した転倒崩壊. 崩壊高さ 25m, 最大幅 15m, 崩落土量(550m³). ロックシェッド端で発生.



写真-2.1.7 道路改良中工事中の既設斜面の切土で発生. 崩壊高さ 15m, 最大幅 10m, 崩壊土量 250m³.

一方、写真-2.1.5～写真-2.1.7は、前述の岩盤崩壊に比べると少し規模が小さい。しかし、おそらく我が国の山岳道路沿いではもっとも多い規模の崩壊であり、その存在自体は、1/5000～1/2000 クラスの県や道など管轄図や道路台帳などで管理されている。崩壊は、山岳道路の建設、改良時の切土や、既設のり面の崩壊ないし拡大といった形で発生し、時折甚大な事故に結びつく。既設の吹き付けのり面や上方への拡大崩壊も多発傾向にあり、対策工の老朽化だけでなく地山そのものの劣化も懸念されている。これらの発生も、いずれ突発的であり、写真-2.1.7では、崩壊前日まで異変には誰も気づかず作業が行われていた。

一方、写真-2.1.8～写真-2.1.10は、前述の岩盤崩壊に比べると遙かに規模が小さい。しかし、おそらく我が国の山岳道路上の斜面には最も広く分布するタイプの岩盤崩壊である。一つ一つの露頭の規模は小さいが、前述の管轄地形図外となる斜面上部から山頂にかけて広く分布し、植生に被われているため空中写真では検出困難であり、ほとんどの場合地形図にも記載がない。道路から100m以上の比高を持つ斜面上部に発生源が点在することもめずらしくないため、崩壊により落下した岩塊が扁平な場合には斜面途中で停止してしまうことも多い。このため落石どころか発生源である露頭の存在による危険を、道路上からの調査だけでは見逃してしまうことも少なくない。



写真-2.1.8 落石と報告されることが多いが、発生源は不連続面に規制されており、明らかに岩盤崩壊。



写真-2.1.9 山岳道路山側斜面の上方に露出するゆるみの進んだ岩盤露頭(片岩)。落石発生源の多くはこのような岩盤露頭を発生源としている。



写真-2.1.10 花崗岩の露頭 不連続面は開口しているが変位はみられない。落下した岩塊形状から、下方が抜けてオーバーハングした岩塊が崩壊したものとみられる。

写真にみるように、発生源となるこれらの露頭は、多くの場合割れ目は開口しており、変位が明瞭であることも珍しくない。ただし、露頭を構成する岩盤全体が崩壊することはほとんどなく、そのなかの一部の岩塊が開口し、変位した岩塊が不連続面を境界に抜けだすようにして落下する。道路上への落下規模が小さいと、単に落石として処理され待ち受け対策のみが行われるが、時折規模の大きな岩塊が落下すると、問題が突然クローズアップされる。いわば静かな岩盤崩壊ともいえ、このような災害も近年増加する傾向にある..



写真-2.1.11 山岳道路上の斜面

対策としてロープネットが使用されるが、その中で岩塊の分離による不安定化が進行している。ネット対策後の経過年数は約 12 年。

写真-2.1.11 は、ロープネットで覆われた岩盤崖面の様子である。ロープネット対策後 10 年以上が経過すると、多くの岩盤崖の表面では、風化によるブロック化とブロックの移動が始まる。最初のうちはロープネットで抑制されていても、少し大きいブロックはネットを破損させ、徐々に下方への変位が進行する。この後、ネットを突き破って姿をあらわ

にするようになり露出した岩塊が崩れると、今度はネット上を高速で滑るように落下する。土砂斜面に比べると、岩盤構造物は維持管理するという意識が低く、その対象になりにくい。土砂に比べて変位の顕在化や破壊までの経過時間が単に長いというだけであり、決して維持管理が必要ないという訳ではない。

以上のように、ひとくちに岩盤崩壊といっても、極端に規模の大きなものから小規模なものまで含まれ、その崩壊様式もさまざまである。ただし、いつも大規模な崩壊ばかりが発生するという訳ではなく、むしろ大規模な崖斜面や、山体頂部に広く点在する小規模ながらも緩みの進んだ露頭から発生する、小さな崩壊の方がはるかに多い。

2.1.2 岩盤崩壊の規模と対応の考え方

岩盤崩壊は、写真に示したように、規模や崩壊様式にさまざまなタイプのものが存在する。規模だけをみても、地すべり様を呈する巨大崩壊から小さなブロック崩壊や小規模な剥離・崩落まで非常に範囲が広い。巨大なものでは、 $1/50000 \sim 1/25000$ の地形図上でも、二重山稜や滑落外といった特徴的な地形の存在から容易に認識できるものもある。なかでも巨大崩壊は、一般に滑動型を示すものが多く、1984年の長野県西部地震による御嶽山の大崩壊($34 \times 10^6 \text{m}^3$)や、1978年の伊豆大島近海地震における稲取地すべり(幅 2km×奥行 5km)の他、大谷崩れや七面山の大崩壊などが知られている。一方、前節の写真1～4で示した崩壊は、いずれも 10^6m^3 以下であり、また写真5以後のものははるかに小さく、なかには 10m^3 に満たないものもある。

「岩盤崩壊の考え方」では、このような岩盤崩壊の規模を、図-2.1.2のように分類している[4]。

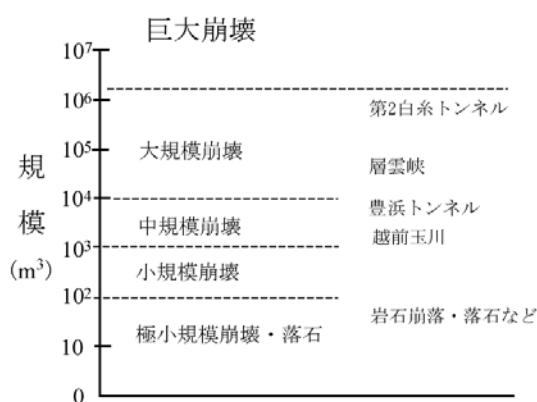


図-2.1.2 岩盤崩壊の規模

このように、岩盤崩壊と呼ばれるものの規模の範囲は非常に広いが、一般的にはその規模が 10^6m^3 以下の、岩石(岩塊)を主体とする崩壊を岩盤崩壊として扱い、 10^2m^3 以下のものを小規模崩壊ないし落石と呼ぶことが多い。この区分に従えば、写真-2.1.1の第二白糸トンネルと写真-2.1.3の層雲峡が大規模崩壊に、写真-2.1.2の豊浜トンネルと写真-2.1.4の越前海岸が中規模崩壊に、また写真-2.1.5~2.1.7は極小規模崩壊ないし落石に区分される。ただし、発生源に着目すると写真-2.1.5~2.1.7の例も、その発生源は既往・潜在の不連続面を分離面としており岩盤崩壊そのものといえる。実際には、このような小規模崩壊の方が発生する割合は高く、狭い地域でみても全国的にみても、年に数回~10数回の頻度で発生し、鉄道や道路にしばしば被害を与えていることは周知の事実である。

このように発生頻度の高い中小規模の崩壊に対しては、不安定で危険な岩塊の存在の検出と同時にその影響評価と予防対策という問題もある。影響評価の問題は、落下後の三次元的な運動予測評価法の必要性とともに信頼性という問題も含んでいる。豊浜トンネル崩落災害後、落石対策工の開発・改良が加速し、現在では機能も大きく向上しているがその分価格も高価になっている。従来、一律に配置されていた落石対策も、今後はこのような崩壊後の三次元挙動を考慮して想定される災害規模に応じた、メリハリのある合理的な対策計画へと移行することが望まれる。

以上、述べてきたように、岩盤崩壊は巨大~大規模から中~小規模まで幅広く存在し、地すべりや土砂崩壊と異なり、崩壊形態も崩壊後の挙動も複雑である。このような問題に対し、岩盤斜面ハザード委員会(土木学会)では、以下のようなカテゴリー区分を行って岩盤崩壊を区分している。

- カテゴリー1 : 規模が大きく発生頻度も低い。規模が確認できても発生時期の予測は現在の調査・計測技術では困難
- カテゴリー2 : 中小規模で発生頻度もやや高いが調査による評価がある程度可能
- カテゴリー3 : 小規模だが発生頻度は高いが被災規模は小さい。調査による評価可能。

岩盤崩壊の問題は、規模の問題も重要であるが、落下後の問題も重要であることはもちろんであるが、同時に対策が可能であるか否かという問題も忘れてはならない。本研究では、カテゴリー2とカテゴリー3のうち発生源を岩盤とするものを念頭においている。

2. 2 岩盤崩壊の発生要因

大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会[1]では、大規模岩盤崩壊発生の背景として、日本列島がプレート境界に位置しており現在もなお隆起を続ける変動帯にある点をあげ、このような日本列島の成り立ち自体が、大小の断層の発達や物性の脆弱化させた要因としている。なかでも、北海道の海岸沿いで発生する大規模岩盤崩壊の発生要因には、氷河期後の海面上昇がもたらした海岸浸食と、それによる海食崖の後退が直接的な原因として大きく働いていることを指摘している。また、同委員会報告書では、その崩壊発生頻度を、海面下の海蝕台の幅から、一定厚さの崩壊によって浸食が進行したと仮定すると、大規模崩壊の発生頻度は 100 年から 1000 年のオーダーになるものと推定している。一方、このような大規模崩壊は別にしても、我が国に広く分布する脆弱な地質と、降雨や凍結などを原因とする風化の進行は、山岳斜面中に散在する岩盤露頭の緩みを促進させる。これが原因とみられる小規模崩壊の頻度が高いことは、前節で述べたとおりである。

ところで、斜面崩壊の発生要因は、表 2.2.1 に示すように、一般に素因と誘因分けて考えられる。岩盤崩壊にかかわる素因としては、急崖や不安定な地形の存在、割れ目の多さ、岩盤の耐風化性、変質の他、地質構造や高い地下水位の存在など、もともと斜面に内在する崩壊因子があげられる。また、誘因には、発生の直接の引き金となった豪雨、地震、融雪、火山活動などがあげられる。ただし、岩盤崩壊は極小規模な剥離や落石を除けば、地震にせよ豪雨にせよ、他の土砂災害に比べてその関係はそれほど高くない。岩盤崩壊では素因が重視される所以である。

表 2.2.1 岩盤崩壊の素因と誘因

種 類	要 素		
素因 (岩盤自体 の特質)	地形	斜面形状(断面) 斜面型(平面) 傾斜・勾配 オーバーハングの有無	
	地質 (岩質)	岩種・岩質 風化の程度 変質の有無	物理特性
	不連続面	断層・破碎帯の分布 不連続面の分布 弱層の有無	力学特性
誘因 (外的要因)	降雨、融雪 地下水・浸透水の有無 地震		

2.2.1 岩盤崩壊発生の素因

(1) 地形的特徴

例えば、地すべりの調査では、その地形的特徴として二重山稜、溝状凹地、頭部陥没地形や小起伏地といった、地滑り特有の地形が知られている[3]。多くの地すべりは、これらの地形的特徴をもとにその存在が識別され抽出される(図 2.2.1)。しかしながら、海岸沿いの海蝕崖や山岳道路脇の急崖斜面で発生する岩盤崩壊には、崖地自体を巻き込むような地形的特徴が認められる場合を除けば、このような危険箇所を特定するための特徴的な地形が少ない。このため危険な岩盤崩壊の検出は地すべりのように、特徴的な地形の明瞭さで検出するのではなく、斜面の形状(傾斜、高さ、型)やオーバーハングといった地形的特徴(図 2.2.2)と、後述する不連続面の組み合わせを中心に、範囲を絞り込む作業が必要となる。

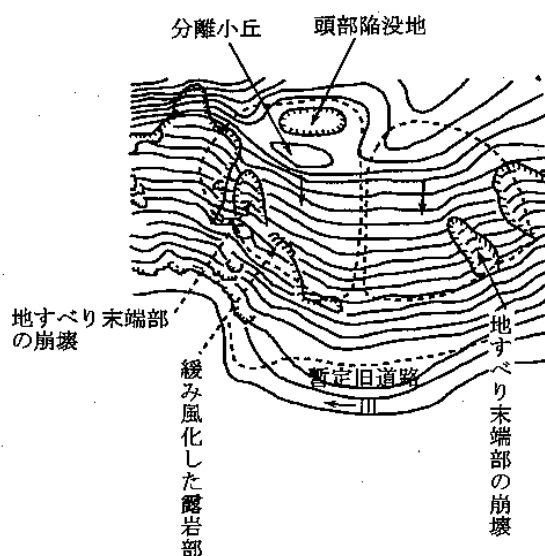


図-2.2.1 岩盤地すべりの地形的特徴. 大規模崩壊には類似の地形がみられることが多い

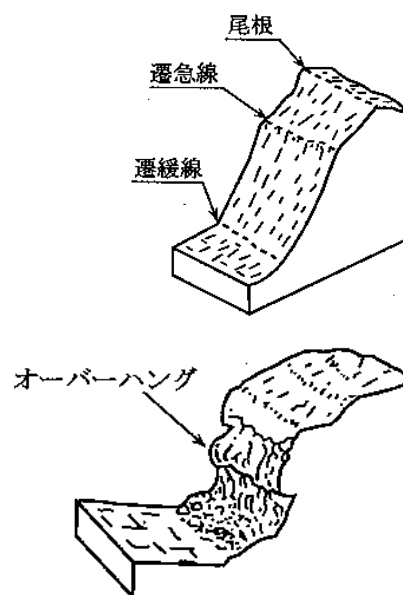


図 2.2.2 岩盤崩壊の発生場の地形

しかしながら、これまで多くの場所で大小の岩盤崩壊が発生しているにもかかわらず、崩壊の発生位置やその形状を詳細に調べて比較し整理した研究は少ない。北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会[5]は、北海道の日本海沿岸地域、太平洋沿岸地域、内陸中央地域という3カ所において、崖面中の崩壊跡地形を詳細に検討し、岩盤崩壊の特徴を報告し、これまでにない貴重な特徴と問題を提起している。

日本海沿岸地域は、積丹半島を中心とする地域であり、海食崖の比高は最大220mほど、傾斜は60~90°の遷急線の明瞭な海食崖が続く。地質は新第三紀中新世の火砕岩と溶岩からなるが、なかでも火砕岩類はハイアロクラスタイトと呼ばれる亀裂の発達に乏しい軟岩

で、後述するシーティング節理が発達することが特徴とされる。太平洋沿岸地域は、えりも岬を中心とする地域で、海食は既に停止した場所が多く、比高 40～150m の崖斜面の傾斜は 50～70° とやや緩く、遷急線も不連続である。地質は、白亜紀から新生代にかけての日高累層群(砂岩・粘板岩)と呼ばれる付加体の岩石が中心である。一方、内陸中央地域は、河川浸食によって形成された急崖で、比高は最大 200m におよび、75～90° のほぼ直崖をなす溶結凝灰岩の岩壁が知られている。

報告書では、崩壊の形態を滑動型(平面、くさび、複合)、崩落、転倒の計 5 タイプに区分し、比高、傾斜、地質との関係を詳細に調べて、地形や不連続面に対して次のような特徴を報告している[5]。

- 1) 大規模崩壊が発生する崖の傾斜は 60° 以上である。
- 2) 溶岩や貫入岩では、海食崖の比高が大きく傾斜が急になるほど崩壊規模が大きくなる。また、火砕岩では亀裂の少ないものほど崩壊規模が大きい傾向があり、これについては不連続面だけでなくその物性も影響していることが考えられる。
- 3) 規模の大きな崩壊ほど発生頻度が減少する。ただし、崖の比高が大きくなる、そして海食が活発な崖ほど頻度が高くなる傾向も指摘されている。
- 4) 岩盤崩壊箇所の 8 割近くで湧水の分布が認められる。

このように、大規模岩盤崩壊には、比高の高い崖、60° 以上の急崖、遷急線やオーバーハングの存在といった地形上の共通点のあることがわかる。

〈遷急線〉

遷急線は、斜面勾配が緩斜面から急崖へと変化するラインを指し、浸食前線あるいは開析前線と呼ばれることもある。きわめて長い間に繰り返し発生する斜面崩壊によって形成されたものであり、一般に風化深度が深く土砂化が進んでいることが多い。実際、遷急線付近に露頭する岩盤は、割れ目の開口や変位が進んでいることが多いことから、崩壊規模を問わずしばしば小崩壊・落石の発生源となる。

〈オーバーハングとその奥行き〉

岩盤崩壊の発生が最も懸念される地形としてオーバーハング地形がある。急崖部の下部斜面に弱層が存在し、その部分の浸食が進行すると、上部の岩塊が張出した形が残る。張り出した岩体の自重によって変形が進むと割れ目が発生し、やがて崩壊が発生する。崩壊の規模は、ノッチと呼ばれるオーバーハング下の奥行きが深いほど大きい。

オーバーハングは、一般に海岸沿いの急崖部で大規模な崩落の原因になるとされるが、河川浸食の大きい山岳地や通常の崖斜面にもしばしばみられ、不安定な岩体下面からの小規模岩塊の剥離、崩落は落石災害の原因となる。ひとくちにオーバーハングといっても、そこで起こる崩壊にはさまざまなタイプがある。一般に、溶岩や貫入岩での奥行きは 5m 以下といわれるが、同じ火山岩のなかでもフローユニットによって規模や存在密度が異なるなど、同じ地質でも形成しやすさという点では異なるようである。

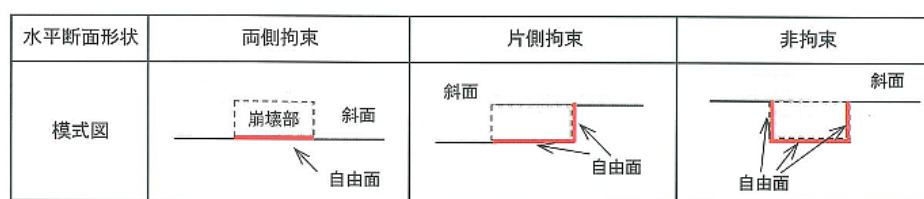
このようなオーバーハングの成因と崩壊との関係に関する研究は多く、応力拡大係数を

用いた亀裂進展に関する研究[6]，オーバーハングの深さと崖の傾斜・圧縮強度および圧縮強度/引張強度を関数とする崩壊関数を用いた安定度評価法[11]などがある．いずれにしても，圧縮強度と引張強度が大きく関係していることは間違いないようである．

＜平面的にみた岩塊側部の拘束条件の影響＞

一方，もっとも興味深いのは平面的にみた崩壊部の形状である．図 2.2.3 は，崩壊箇所の平面形状を，両側拘束，片側拘束，非拘束の 3 種類に区分したものである[5]．このような平面形状と崩壊件数(80 件)との関係を見ると，片側拘束が最も多く 64%，ついで非拘束で 35%，両側拘束はわずか 1 件に過ぎなかったとしている．報告書[5]では，微地形の規模や地質の不均質性，崖面に直交または斜交する分離面の存在によって片側が解放される地形条件が形成されやすいことが原因と述べている．非拘束は，このような片側拘束の崩壊が進んだ場合の最終形状と想定され，一方両側拘束については特殊な状況下(主に地質と崖面との関係)で発生するものと推察している．このような平面形状からみた特徴は，危険箇所を抽出するうえで重要な着目点となる．

図 2.2.3 岩盤崩壊箇所の水平断面形状[5]



＜主崩壊面の傾斜と規模との関係＞

斜面の傾斜角度と同様，主崩壊面の大部分の角度は 60° 以上であり，これは引張り-圧縮応力の集中と斜面傾斜角との関係を FEM により説明した川本らの報告と一致する[12]．ただし，斜面の傾斜とは逆に，主崩壊面の角度が緩傾斜になるほど崩壊規模は大きくなる傾向もある．一方，主崩壊面の傾斜が 90° を超えると崩壊規模は小さくなる．特に注目されるのは，崩壊形態との関係であり，主崩壊面の傾斜が 80° 以下では滑動型が， 80° を超えると崩落・転倒型が主体になるとしている点であろう．後述する崩壊モデル作成時の留意点となる．

このように，崖斜面と崩壊を結びつける素因は，地形の大小だけでなく，崖面中の微地形の凹凸にも表れる．こため，規模の大きい崖面ほど，大規模から中小規模に至る岩盤崩壊の多くの素因と誘因を抱えた斜面ということになる．

(2) 岩盤崩壊と不連続面

地形や崖面の起伏状態に大きな特徴を与えるのが，不連続面である．岩盤斜面には，断層や層理といった地質・地層構成や地質構造を規定するように地質的境界面や，節理，割れ目による分離面などがある．不連続面の成因には大きく次の 2 つのタイプがある．

1) 地層形成時の不連続面

堆積岩の層理面、火山岩が冷え固まるときにできるクーリングジョイント(柱状あるいは板状節理)、マスタートジョイント、凝灰岩の熔結部と非熔結部の境界などが該当するが、付加体中にしばしば見られる、物性を左右する潜在的な不連続面もある。

2) 構造運動や破砕作用に伴う不連続面

構造運動や破砕作用によって生じた大小の断層、岩盤クリープなどによって生じた不連続面がこれに該当する。

最も注意すべき不連続面として断層がある。しかし、岩盤崩壊の多くは、断層以外のさまざまな中小の不連続面によって発生する。岩盤崩壊の調査では、これらのすべての不連続面にも注意を払うことが重要である。北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会では、岩盤崩壊にかかわるさまざまな不連続面を、表-2.2.2 に示す断層、摂理、総理、貫入境界、亀裂に区分している。

表-2.2.2 代表的な不連続面の特徴

断層	地層や火砕岩の礫を切断している。露頭レベルで変位が確認できる。破砕帯が存在する。		
節理	岩盤中に規則的に発達する分離面。面に沿った変位が認められないもの		
	冷却節理	柱状節理	柱状を呈する
		板状節理	板状を呈する
		マスタージョイント	溶岩岩体中で、溶岩流出時の旧地形の影響を受けたとみられる連続性が良い不連続面
		方丈節理	花崗岩にみられる規則的な分離面
	構造的節理	空中写真判読により認められるリニアメントとの対応が認められる	
シーティングジョイント	崖地形と平行に発達するもので冷却節理、構造的節理に該当しないもの。		
層理	堆積構造を示す地層境界		
貫入境界	貫入岩と母岩の接触部		

現地の急崖でみられるこれらの不連続面は、地質によって大きく異なり、また同じ地質であってもフローユニットによって異なる。ここでは、前述の北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会より、崩壊にどのようなタイプの不連続面が関わっているのかについてみる。

<造構造運動によって生じる大規模不連続面の形状>

これまで、ほぼ地質の成因にかかわる不連続面についてみてきた。岩盤中には、この他にも変位の進行によって生じる不連続面が認められる。変位といっても、数ヶ月～数年単位のものから地質時代にさかのぼるものまであり、想定されるせん断の方向が岩塊の安定に影響している考えられる場合も少なくない。崖面の観察、ボーリングコアの観察にお

いて、もしせん断面の形状からせん断の方向が読み取れるのであれば、それは危険度を評価するための有益な情報となる。

図 2.2.4 は、実験室で岩盤を実際に破壊させて、その進行に伴う不連続面のパターンを示した図であり、図の上から下へと右ずれ変位を増大させたときの破断面の成長過程を示している。D は変位量を表している。この実験から、右ズレ”ミ”，左ズレ”杉”型などの名称が生まれている。この実験は考案者である Riedel にちなんでリーデルせん断実験 (Riedel shear experiment) と呼ばれており、定性的だが岩盤崩壊の背景を読み解く上で重要である。

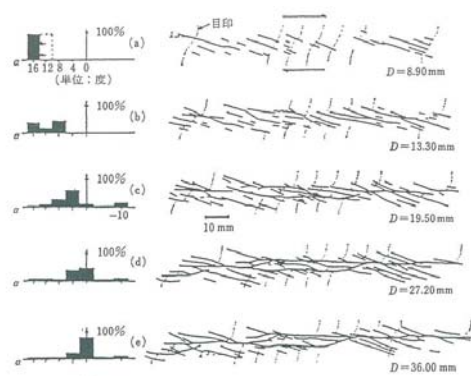


図 2.2.4 リーデルせん断実験による断層の成長過程(Tchalenko,1970)[13]

図-2.2.5 は、危険岩塊除去作業後の岩盤スケッチにみられる大規模不連続面のスケッチである。推定変位方向を観察から読みとり、矢印で示した。このパターンはリーデルせん断実験で報告されている左ズレパターンとほぼ一致する。このような対照結果から、図-2.2.5 では右側から左側に向かって押し上げるように割れ目が形成されたことが伺える。

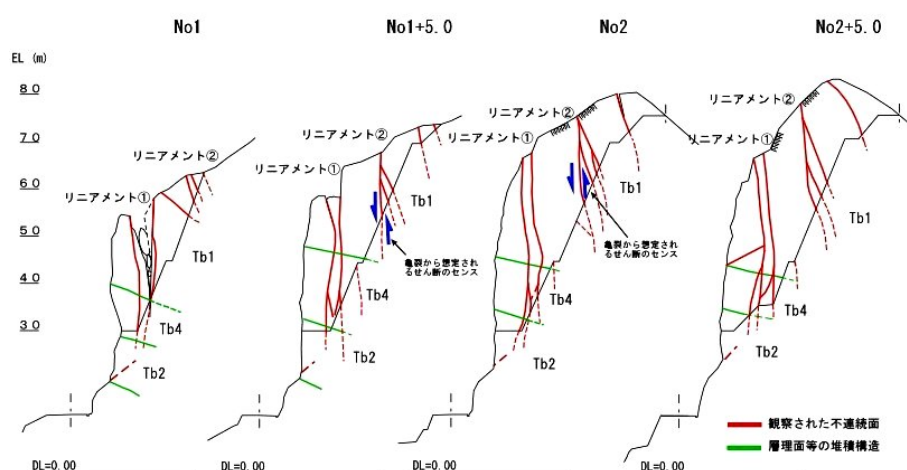


図-2.2.5 岩盤除去時に観察された崖内部のシーティングジョイント[4]

このような、せん断変位に伴う特徴的な不連続面のパターンは他にも多く知られており、

横ズレ断層の末端部にみられるスプレー断層や、同じく横ズレ断層にみられる解放性屈曲(プリアパート)などがある。このような、せん断変位に伴って生じる不連続面のせん断パターンは、それ自体が岩盤崩壊の安定性を決定するものとは限らないが、背景を推定したり、危険な領域を特定するうえでの重要な証拠となることが多い。

構造的節理は、一般に空中写真判読によって明瞭なリニアメントとして確認できる。

〈シーティングジョイント〉

崖面に平行な関係にある節理をシーティングジョイントと呼んでいる。もともと花崗岩体に発達する水平ないし緩傾斜の節理を指し、上載荷重の除荷に起因するとされるシーティングジョイントであるが、豊浜トンネル坑口崩落災害以後、海岸沿いの急崖斜面において、前述の構造的節理以外にも崖面背後に潜む危険な節理としてクローズアップされた。

図 2.2.6 左は、柱状節理の発達する層雲峡の天城岩の崩壊面のスケッチである[6]。この崩壊面の様子から、風化がかなり以前から進行していたこと、風化の範囲が崩落岩塊のほぼ半分に達した段階で不安定となったことなどが伺える。一方、図 2.2.6 右は、ほしば覆道(平成 9 年 6/7)で発生した岩盤崩壊(5450m³)の崩壊面のスケッチである。地質は日高累層のホルンフェルス(付加体)であり、潜在的な細かい亀裂が発達している。ここでも、全体の 50%あまりが強く風化した強褐色を呈している。同様の現象は第二白糸トンネル坑口斜面や越前玉川海岸での崩壊後の調査でも報告されている。このことから、規模にもよるが 30~50%の風化を受けた亀裂面が存在すれば、オーバーハング等の地形状況やその他の誘因によっては大規模崩壊に結びつく可能性もあり得るとしている[6]

一般に、岩盤崩壊は2~3つの不連続面に囲まれたブロックが崩壊する。文献[5][6]では、崩壊に関与した不連続面のうち最も面積の大きい不連続面を主崩壊面として 38 箇所の崩壊を調べている。その結果もっとも多かったのが構造的節理とシーティング節理で、崩壊形態を問わず全体の 68%強を占めた。これに次ぐのが冷却節理(18%)、層理面(8%)、そして貫入境界(5%)であった。同報告書では、構造的節理とシーティング節理、さらに滑

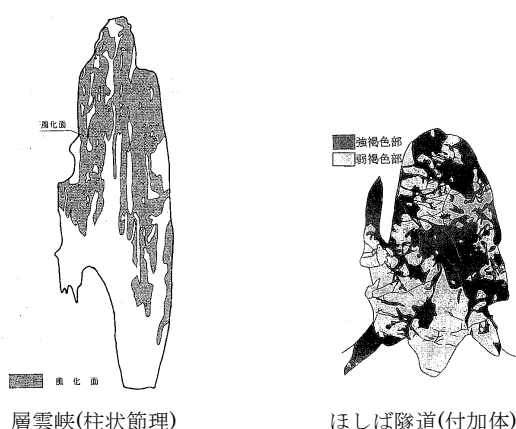


図-2.2.6 崩壊面における風化面の分布[6]

(図中の黒い部分が風化面)

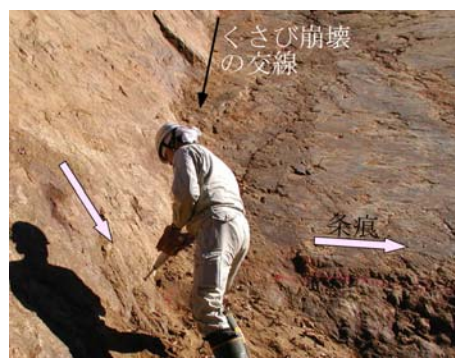


図-2.2.7 構造節理と崩壊面

動において層理面が関与すると崩壊は大規模となり、冷却節理、貫入境界が関与すると小規模になるとしている。

一方、図 2.2.7 はくさび崩壊を起こした場所での崩壊面である。左側の面にくさび破壊方向に線条痕がついているのに対し、左側の面にはくさび破壊方向の跡がみられず、むしろ水平方向の条痕が目立つことが特徴である。このことから、右側の不連続面が構造運動に由来する”構造的節理”であると判定される。この崩壊の例では、線条痕の残る右側の不連続面はほぼ 10m 間隔で規則的に分布し、その方向は地形上のリニアメントにも不鮮明ながら表れている。これに対し左側の面は 3~5m 間隔で不規則に分布し、方向の側方変化も大きいことから、浸食と風化によってかなり後になって形成された新しい不連続面とみられる。削痕の有無からみると、写真中の右側の不連続面は、直接くさびを支えてはいなかったことになる。

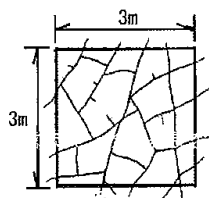
以上、崩壊面は、実際に崩壊するかなり以前から風化が進むこと、シーティング節理をのぞく構造的節理はリアメントとして事前にその存在を認識できる可能性があること等が指摘できる。そして、ともに崩壊面の風化が 50%を越えると危険な状態になる。

<分離面密度>

不連続面を定量的に扱う方法については後述する。ここでは、判定的に評価された不連続面の密度と岩盤崩壊との関係について述べる。前述の北海道での報告書[5]では、図 2.2.8 に示すように、一辺が 3m の正方形の枠を設定して、この枠と交差する不連続面の数を”分離面密度”として、層状岩盤、塊状火砕岩、溶岩、貫入岩の地質別分離面密度と崩壊規模を調べ、分離面の発達程度が最大崩壊規模を決定する大きな要因であるとしている。

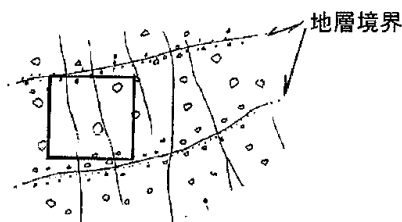
残念ながら、崩壊形態との関係については言及していないが、同報告書には分離面密度と崩壊の幅、長さ、厚さとの関係を示した図が掲載されており、図 2.2.9 にはこのうち分離面密度と厚さとの関係を示した。その結果によれば、層状・塊状の火砕岩では 5~20m と幅広く大きい、溶岩や貫入岩ではおおむね 5m 以下である。崩壊形態との関係は不明ながら、あらかじめ分離面密度を参考にすることで、岩盤崩壊の奥行きを推定することが可能とみられる。(なお、ここで層状・塊状火砕岩としたのはハイアロクラスタイトであり、割れ目と同時に物性が問題となる。)

○溶岩・貫入岩など分離面間隔が密な場合



・ 3 × 3m の正方測線内を設定し各基線に交わる分離面数を全基線長 (12m) で除したものを分離面密度 (本/m) とする。

○火砕岩など分離面間隔が粗な場合



・ 任意の大きさの正方測線内に最低 2 条の分離面が入るように測定箇所を設定し、全測線長を計測して分離面密度を算定する。

図 2.2.8 分離面密度の計測法[7]

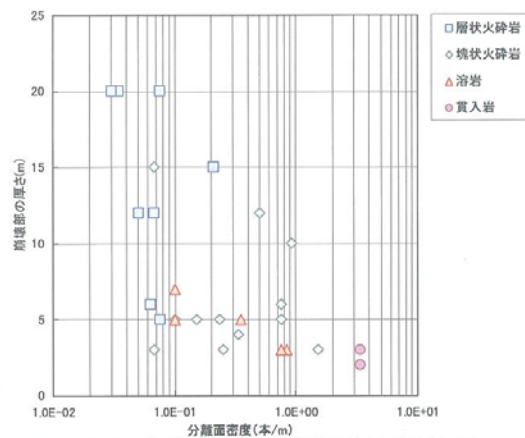


図-2.2.9 分離面密度と崩壊部の厚さ(火砕岩)[7]

＜小規模不連続面＞

不連続面のなかには、その成因から認識されているものの、通常は不連続面としての認識が難しい種類の割れ目がある。このような割れ目は、緑色岩類、黒色岩類と通称される付加体の岩盤中に潜在的にみられるが、事前に露頭で危険な不連続面として認識できることは少なく、ボーリング等によって確認して初めてわかることが多い。この理由は、地史的な地形風化が進み、危険な凸地形を作ることが少ないためと考えられる。このような付加体の岩石については、物性の項で述べる。

(3) 物 性(地質)

岩盤斜面の安定性を左右する要因の一つに岩盤の物性(地質)がある。風化や圧砕によって微細な割れ目の発達した硬岩や、固結度が低く変形性の大きい軟岩などで、物性が崩壊の支配的要因となることが多い。最も知られているのが、新第三紀の黒色泥岩でのスレーキングであり、建設工事に際してしばしば問題となっている。一方、泥岩とは別に、一見して硬岩と判定される岩盤が、崩壊すると土砂状を呈することや、危険岩塊除去後10年も経過すると再び剥離・崩落が始まる例が増えている。このような地質に、付加体、あるいは水中自破碎溶岩がある。この2つは成因こそ異なるが、スメクタイト等の粘土鉱物を含む岩盤という点に共通の特徴がある。以下、これらの特徴についてまとめる。

＜スレーキング性＞

軟岩斜面では、掘削時の応力解放と吸水膨張によって、短期間のうちに強度が劣化することがある。このような脆弱で劣化速度の速い地質として、一般には泥岩、凝灰岩などの堆積軟岩、凝灰角礫岩などの火山砕屑物、あるいは熱水変質を受けた火山岩類などが知られている。また、凝灰岩や凝灰角礫岩など、破壊ひずみが小さく脆性な軟岩では、風化・劣化がさほど進んでいなくても、物理的に不安定な急崖部やオーバーハング地形などでは持続的な応力の変化によって亀裂が伸展し、崩壊の原因となることがある。このような岩

盤の多くは、岩石中にスメクタイトを含むことが多く、乾湿繰り返しによる劣化速度が速く、現象としてスレーキングを起こすことで知られている[3]。海成泥岩では、吸水量の増加が粘着力の低下に結びつくことは知られており、切土工事においてしばしば問題となることから、既に乾湿繰り返しによる吸水量増加率とりのり面安定勾配としてまとめられている[14]。しかし、泥岩ほど劣化が速くない他の岩種についてはこのような関係はまだ明らかではない。

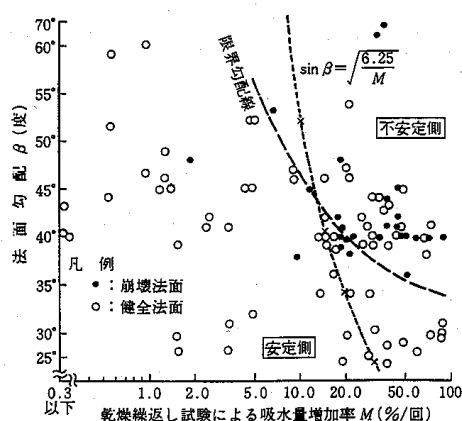


図-2.2.10 乾湿繰り返し試験による吸水量増加率

-のり面とりのり面の安全性[5]

<劣化速度のやや速い地質>

近年の研究で、粘土鉱物の風化与える影響や、成因的にその種の構造を持つ岩種がクローズアップされている。ハイアロクラスタイトや付加体などの地質である。

我が国は、太平洋プレートに押しつけられた付加体の堆積物よりなる。これらの地質(多くは、変成度の違いをもとに黒色、緑色岩類あるいはホルンフェルスなどとして記載される)の中には、潜在的に網の目状のマイクロクラックが発達しているものがある。そして、自然の地山中にあるときは30～80Mpaもの強度を示し、弾性波速度も4km/sを越えるが、掘削による応力解放を受けると短い時間で砂状に崩れる[15]。このためトンネル掘削時にしばしば問題となる。このような岩石では従来の経験的な弾性波速度による地山区分の適用が難しい。このため、本地質のための区分低減案も提案されている[16]。一方、付加体の分布する地域の山体は丘陵状となっていることが多いため、岩盤崩壊との関係は低いものと考えられていた。しかし、2001年に北海道北見で発生した北陽斜面崩壊は、この緑色岩で発生しており、同じく北海道えりも町から浦河町にかけての地すべりや崩壊の多発する地域でも同様の崩壊が発生している。

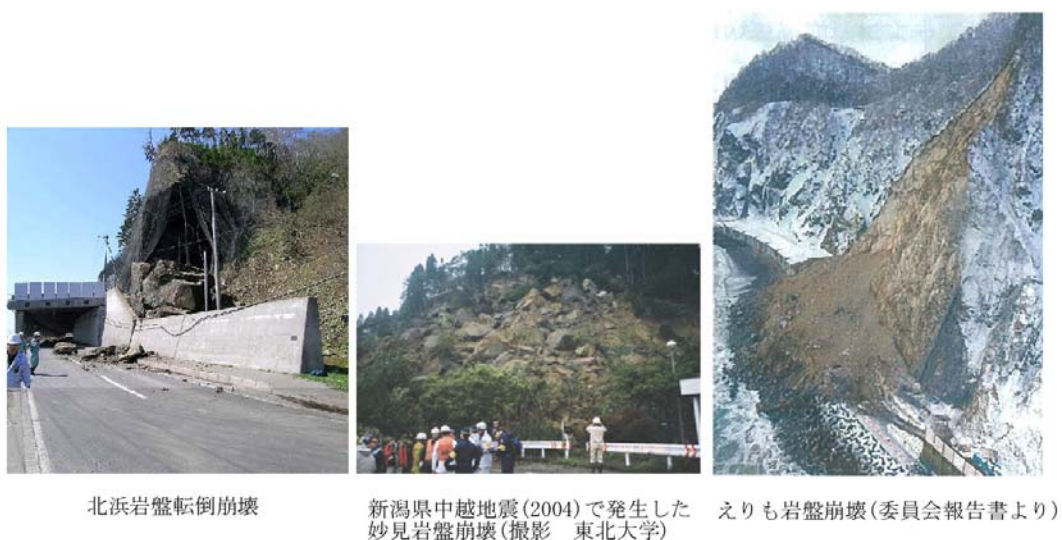
図2.2.11は、和歌山県南紀地域でのトンネル内ボーリングのコアである。左側は薄片による顕微鏡写真であり、網の目を構成する茶色の部分にスメクタイトが生成されている。右側はそのコア写真であり、掘削後1～2日で写真のような割れ目が生じ、コアは自然に砕

片化する．このような割れ目を生じる地質であるにもかかわらず，弾性波速度は 4km/s を超える．



図 2.2.11 付加体のマイクロ構造

これまで，危険なブロックを検出するための大小の地形的な特徴を述べてきたが，このような地質に対する事前調査の着目点は，そこが付加体である，というだけで他には今のところ見あたらない．しかしながら，岩盤崩壊発生後の崩壊土砂を比較すると，その違いは一目瞭然である．図 2.2.12 の写真は左から，ハイアロクラスタイトのブロック転倒崩壊，妙見でのブロック崩壊であり，右が付加体中で発生したえりもの崩壊である．このような中～小規模不連続面が発達する崩壊の検出，危険度予測はブロック状崩壊より難しい．



北浜岩盤転倒崩壊

新潟県中越地震(2004)で発生した
妙見岩盤崩壊(撮影 東北大学)

えりも岩盤崩壊(委員会報告書より)

図-2.2.12 付加体の崩壊堆積物(左は写真 2.1.6 と同じブロック崩壊，
中は砂岩部のブロック崩壊，右は付加体の崩壊)

2.2.2 岩盤崩壊発生誘因

岩盤崩壊の誘因は、構造発達史を含む地質的な素因に対して、外的作用と呼ばれることもある。誘因には、一般に降雨や融雪、凍結融解などの気象的要因と、地震や火山などの地象要因がある。この他にも人為的要因もあるが、ここでは前述の気象・地象要因を中心に述べる。

斜面災害の危険度を評価するうえで、崩壊と誘因との直接的な関係を把握することがもつとも重要であり、合理的な対策に結びつけられる。しかしながら、岩盤崩壊では、他の土砂災害や地すべりなどと異なり、地震をのぞけば誘因との関係が明瞭ではない。しかしながら、近年の事例研究によって、少しずつではあるが、その実態が明らかになりつつある。以下、降雨、凍結・融解、地震を中心に岩盤崩壊との関係をまとめる。

<降雨>

地盤工学会北海道支部では、北海道の日本海沿岸地域、太平洋沿岸地域および内陸中央地域の道内の3つのエリアにおいて落石、岩盤崩壊発の気象条件等による発生の違いを調べるための調査を実施し、落石、岩盤崩壊が多発する時期を以下のように報告している[6]。



図-2.2.13 落石・崩壊多発地域の調査域

<崩壊の発生時期>

日本海沿岸地域	3～4 月
太平洋沿岸地域	2～4 月(襟裳岬西側は 2～3 月, 襟裳岬東側は 3～4 月)
内陸中央地域	4～6 月

これらの時期は、いずれも融雪期にあたり、凍結融解が繰り返される時期である。調査した崩壊の規模は、 $10\sim 100\text{m}^3$ 以上であり、各エリアともに、最も発生頻度の高いのが 10^3m^3 未満であり、規模が大きくなるにつれて発生率は減少することを報告している。また、報告のなかで、 10m^3 以下の小規模な崩壊は、多雨期である 7～9 月にも多発する傾向にあり、このことから、規模の小さい崩壊、落石では降雨と密接な関係を持つとしている。

〈凍結・融解〉

厳冬期に、雪で被服されていない崖面では、岩盤が異常な低温や気温変化にさらされると凍結作用が働く。氷点下では、間隙水の凍結による体積膨張(9%といわれる)や凍上による劣化が生じる。特に、間隙率の大きい岩が飽和したり、含水比が大きい場合、割れ目中に地下水がある場合などは凍結しやすい。岩石自体は、凍結したままであれば凍結以前に比べて強度は増加するが[17]、含水状態の岩石を凍結・融解サイクルに供すると、内部の亀裂が増加して岩盤としての強度が低下する。このような性質は間隙の大きい凝灰岩や砂岩のような岩石で特に大きいと考えられる。

一方、岩盤の割れ目中を含む岩盤の凍結深度についての計測事例は少ないが、例えば北海道では海岸沿いより内陸部の方が大きいといわれ、北海道中央部の層雲峡(標高 700m)での凍結深度は 150cm におよぶといわれる[18]。また、凍結誘拐作用のある寒冷地では、冬期から融雪期にかけて小崩壊や落石が多く発生しており、その主原因は凍結融解と推定される。ただし、その影響は前述の気象・降雨による影響と同様、規模の小さい崩壊に対して直接的であり、大規模な岩盤崩壊の直接的発生原因になるとは考えにくいとされる。(なお、割れ目中に氷結があると、その膨張圧で割れ目が開口、伸展する。また、岩盤表面の凍結により地下水の排出が妨げられ、背後に水圧が働いて岩盤の破壊が生じることも崩壊原因の一つになるとする考えもある。)

図 2.2.14 は、凍結が原因とみられる崩壊の発生直後の崩壊面の写真である。湾曲した面は自破碎溶岩中に発達する境界(節理)であり、崩壊は頭部がやや谷地形状であることから、もともと地下水により湿潤していた。開口ぎみの割れ目(境界面)中に浸透した地下水の凍結が引き金となり崩壊したものと考えられる。本州では、標高が 700~1000m 以上の高標高地域でみられ、2 章の写真 2.2.8 は凍結融解が主原因と考えられている。水の集まりやすい地形と常時の湿潤という 2 つが、凍結融解を原因とする崩壊に対する注意点といえる。



図 2.2.14 凍結融解が原因とみられる切土面での崩壊
(北海道，恵山町)

〈地震〉

地震が発生すると多くの斜面崩壊が発生する。地震被害の程度は、地震の規模が大きく震源に近いほど大きいといわれる。歴史的には、常願寺川の大鳶崩れ(1854 年 $M=7.0\sim 7.1$)、善光寺地震による岩倉山の巨大崩壊や虫倉山の崩壊(1812 年 推定 $M=6.0$)などが知られており、近年では長野県西部地震(1984 年)の大谷崩れなどもある。ただし、これらは大規模というより巨大崩壊である。一方、北海道南西沖地震(1993)では奥尻島を中心に刀掛けトンネルや第 2 白糸トンネルなどで多数の中小規模の岩盤崩壊が発生している。また最近では中越地震(2004)の妙見などでも崩壊や落石による被害が発生している。

少し古い資料だが、釜井らは、千葉県東方沖地震(1987) $M=6.7$ の調査で上総丘陵の堆積軟岩(主として砂岩、泥岩)で発生した 160 箇所以上の斜面崩壊のタイプを、図-2.2.15 のように 5 タイプに区分している[19]。釜井らは、地震による崩壊の特徴を、節理に沿ってブロック状に落下することが特徴と述べている。節理や層理などの影響が無視できないことがわかる。

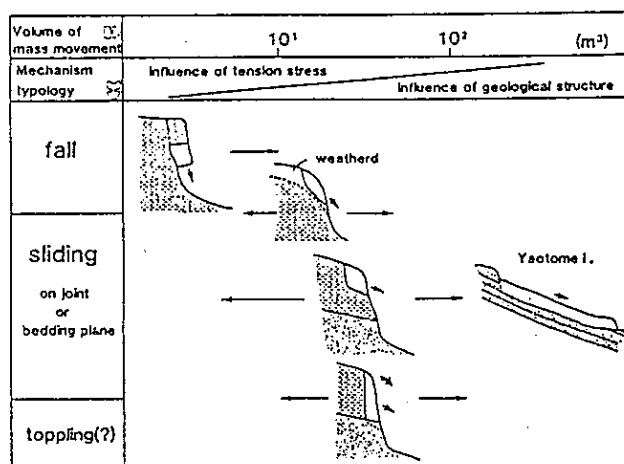


図 2.2.15 上総丘陵で発生した斜面崩壊の分類

千葉県東方沖地震によって最も多かったのは崩落(fall)であるが、その体積は 10m^3 以下であり、移動距離も高さに比べれば小さいと報告されている。一方、泥岩の層理面をすべり面とした平面崩壊やくさび崩壊もあり、それらは $40\sim 60^\circ$ の節理傾斜の斜面で多く発生し、岩塊が滑ったあとは層理面上に条線として残っている。また、数は 3~4 カ所と少ないが、条線のみられないケースもあり、これらは転倒と判定されている。釜井らは、泥岩節理面および層理面のせん断強度を調べ、水平震度法を用いた二次元の安定解析法を用いて 12 箇所あまりの滑動型崩壊における崩壊前の安全率を調べている。その結果、 $300\sim 400\text{gal}$ の最大加速度が作用した場合に地震時安全率が 1.0 となる崩壊ブロックの静的安全率は 2.2 前後にあったと報告している[20]。

地震による崩壊・落石は、その後の北海道南西沖地震(1993, $M=7.8$)や、鹿児島県北西

部地震(1997, M=6.3), さらに鳥取県西部地震(2000, M=6.6), 芸予地震(2000, M=6.7)などでも多発しており, それらの特徴は以下のようにまとめられる.

(1) 遷急線を含む箇所, なかでも平面的な凸部で多発する傾向が強い. 斜面傾斜が 45° ~ 60° で, 遷急線より上部斜面の傾斜は, 急(30° ~ 45°)な場合より 0° ~ 15° と緩い方が崩壊発生の割合は高い.

(2) 新鮮な露頭からの発生は節理に規制された崩落や剥離が多い.

(3) 崩壊面の半分近くで風化が進み, 一部には木の根が進入している.

崩壊面には滑った跡がみらないものもあり, 跳びだすようにして落下したと想定されるものも多い.

(4) 崩壊土砂の到達範囲は, 最大でも崖高さであり, 多くは崖高さの半分程度であった. ただし, 落石は比高さより遠くまで及ぶことがある.

(5) 1991 年 4 月から 1996 年 3 月までの 5 年間における北海道襟裳岬付近の落石と地震の調査結果からは, おおむね震度 5 以上の地震に伴って落石が多発している.

地震による斜面災害規模や数との関係は, 従来は地震のマグニチュードと崩壊面積の関係を示す D.K.KEEFER(1984)の方法や, 地震のマグニチュードと震央からの距離で論じられることが多かったが, 国総研砂防研究室では, 兵庫県南部地震による六甲山地の崩壊事例を基に, 以下のような崩壊危険度評価式を提案している[21].

$$F=0.075I-8.9c+0.0056a-3.2$$

ここに, F は判別得点であり値が大きいほど斜面崩壊の危険度が高いことを示す.

I は斜面勾配($^{\circ}$), c は斜面の平均曲率, a は最大加速度(cm/s^2)である. 小山内らは, 中越地震にもこの式を当てはめ, 地すべりを除く斜面崩壊危険度を相対的に評価できるとしている. さらに, 断層最短距離と地震の規模(マグニチュード)を用いて司・翠川の方法で加速度を推定し, 過去の地震時に発生した大規模崩壊との関係を比較し, 断層最短距離 30km 以内, 加速度値にして 300gal 以上の範囲が大規模崩壊の発生限界と推定している. 3 章で述べるように, 数値解析においても地震波形を入力した解析手法の適用が進められているが, その一方でこのような簡便な手法の適用も必要になるものと思われる.

以上のように, 岩盤崩壊あるいは落石に関する調査からは, さまざまな結果が得られており, 地形的な発生場の地形因子として, 1)尾根部, 2)遷急線付近, 3)露頭崖, 4)急斜面, 5)凸型斜面などが挙げられる. また, 地すべりを除けば, 風化が進んだ岩盤で節理に規制された剥離型の崩壊, 落石が多いこと, 滑動, 滑落タイプ以外では跳びだした後, 落石となったケースが多いことなども特徴としてあげられよう. しかしながら, 地震によって多くの岩盤崩壊・落石が発生しているが, 残念ながら地震によって崩壊する以前の状態が明確なものはほとんどない. 地震は, 直接岩盤崩壊を発生させる要因となると同時に, その不安定化を促進する役目も果たしていると考えられている.

2.2.3 岩盤崩壊の発生要因のまとめ

岩盤崩壊を素因と誘因に分けてみてきた。素因についてみれば、一般的に云われるように、 60° 以上の急崖、不連続面の発達、開口やずれなどの変位といった従来から指摘されている事項の他、崖面中の旧崩壊地形の側方部の状態、すなわち側方の拘束条件などが検出時の重要な材料になると考えられる。ただし、誘因については凍結融解や豪雨、地震などの影響について、震度5以上の地震、緯度や標高にもよるが融雪期の前後等々、従来の知見の域を出ていない。このような素因と誘因との関係に、規模を定性的な関係で示したのが図2.2.16である。

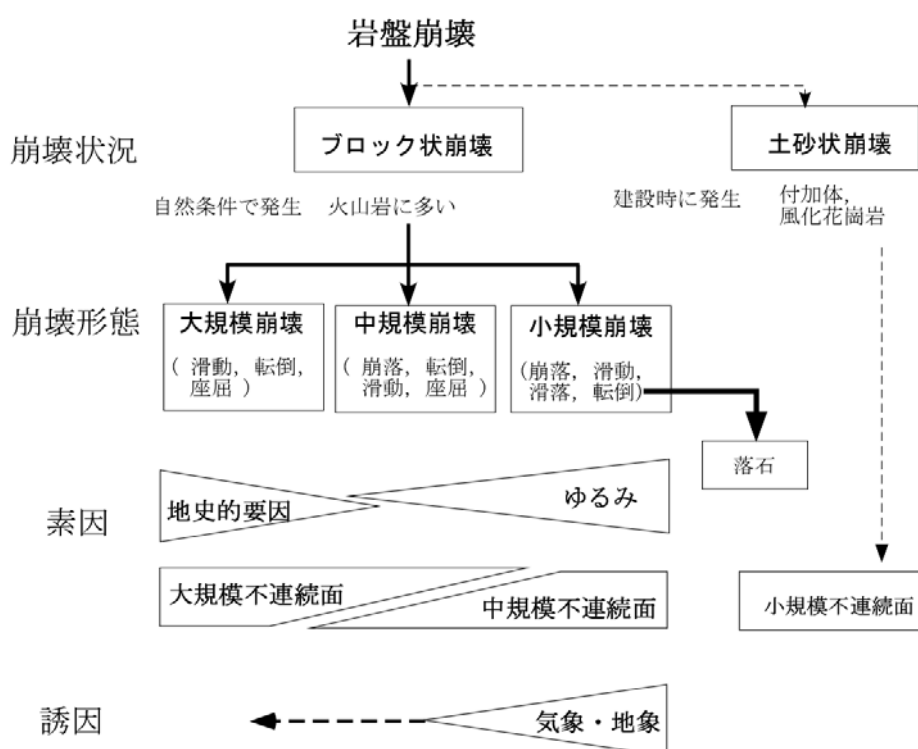


図 2.2.16 岩盤崩壊の発生要因のまとめ

図では、岩盤崩壊を、崩壊堆積物の状態によってブロック状崩壊と土砂状崩壊に分けている。土砂状崩壊は、付加体の分布する地域や構造断層周辺で局所的な破砕を受けている急崖部で発生する。肉眼ではもちろん顕微鏡レベルで発達する小規模不連続面がその背景にあるとみられるが、大規模崩壊と同様、未だその詳細は明らかとなっていない。これに対し、中～小規模崩壊は、ゆるみによる変位が顕著ではなくても、不連続面の組み合わせや旧崩壊地形の側方部を中心に着目すれば検出可能となる可能性が示唆される。

一方、気象・降雨などを誘因とする崩壊や落石は、その発生頻度は高いが規模は小さく、

逆に地震のように頻度は低いエネルギーが大きいものでは規模が大きくなる危険性が高い。ただし、素因である地形や地質に構造的な断層などが存在する場合には、さらに発生規模は大きくなる可能性があり、逆に節理の発達する露頭からの崩壊だけに限れば、規模はそれほど大きくはないとみてよさそうである。ただし、地震を誘因とする崩壊は、降雨や凍結・融解に比べて、崩壊発生以前の状態が不明な場合が多い。地震については、中越地震で崩壊した多くの崩壊面で地下水の滲みだしが確認されたことから、揺れによる急激な間隙水圧の上昇が原因とする意見がある。しかしながら、このような岩盤崩壊は主として層理面沿いに発生しているものが多く、また一部に酸化による汚染跡もみられることから、崩壊面自体が、崩壊時点で 100%接触していた訳でもなさそうである。このようにみると、長年の風化による接触面積の減少が崩壊面の強度低下を招き、そこに生じた地震動をきっかけとして崩壊が発生したと考えることも可能である。凍結融解、降雨などによって発生する崩壊落石も、長期にわたる崩壊素因の進行が、わずかな雨や地震で発生する崩壊の原因となったことも想定される。

このような誘因と崩壊の関係から、素因と誘因を、持続的要因と加速的要因というように区分している文献もある[6]。

持続的要因・・岩盤に対して常に作用している要因

例えば、斜面内に生じている引張力、せん断力、圧縮力の他、化学的な風化など。

加速的要因・・崩壊の引き金となる要因

持続的要因に加えて、地震、豪雨、凍結融解など

すなわち、岩盤崩壊とは、持続的要因が長い時間をかけて崩壊の素因を作り上げ、それが変形や不連続面のずれや開口を生み、進行させ、その蓄積がブロックの力学的バランスを保つための、あるしきい値を超えた時に、崩壊という形で現れる現象ということになる。岩盤崩壊メカニズムの解明の困難さは、我々にとって最も身近な豪雨などの原因と直接結びつくことが少なく、またその前兆を計測で感知することも難しいという点にある。このため、土砂崩壊や地すべりなどと同じ視点で誘因や発生頻度を扱うことには無理が多い。

それ故、岩盤崩壊の調査では、地形の地史的背景を理解し、地形中に刻まれた崩壊の痕跡などから、崩壊のしやすさ、すなわち発生頻度を読み解くことが重要になる。岩盤崩壊の調査において、素因の調査が重視される所以である。

2.3 岩盤崩壊の調査手法とモデル化

2.3.1 岩盤崩壊の調査法

岩盤崩壊や落石の危険箇所の特定や、その危険度の評価がきわめて困難と云われる所以は、その変位の進行を計測によって捉えることが難しく、またその破壊が地表面ではなく地中で進行する、という点にある。このため、調査自体が、ほぼ崖面の、観察を中心にした、いわば素因調査のみに限られる。つまり、岩盤崩壊の調査では、崖面の地形的特徴から、変位が進行しているであろう範囲を抽出し絞り込み、その状況証拠をもとに地山内部の変位の進行具合を推定するという、二つの段階を踏んで判定することになる。このため、初期段階の崖面の起伏の調査は最も重要であり、ここで範囲の判定を誤るとその後の調査のポイントもズレる可能性が高くなる。

(1) 岩盤崩壊の地形的特徴と着眼点

〈岩盤崩壊の着眼点〉

危険なブロックの不安定化は、長期的にみればきわめて緩慢な重力による塑性変形(クリープ)によってもたらされると考えられている。クリープによる変位の進行は、亀裂の開口を促し、新たな亀裂の発生や伸展を助長し、いわゆる”ゆるみ”の原因となる。ゆるみの進行は小規模な崩壊(岩石崩壊)や落石の原因となり、いずれ岩盤崩壊の発生原因ともなる。ゆるみが進行し、崩壊に至る直前の現象は、”前兆現象”と呼ばれている(図 2.3.1)。

・ 岩盤崩壊の形態	模 式 図	前兆現象 および 着眼点
崩 落 岩盤からなる急斜面または急崖より、節理等の不連続面を境として、岩塊が剥離する現象で、崩落岩塊が自由落下、跳躍、バウンド回転によって空中を落下する運動形態をいう。		急崖、不連続面の存在 段差地形 運急岸 沈下 ゆるみ 圧縮性亀裂 あるいは開口亀裂 浸食の進行 オーバーハンギング化 ゆるみ(亀裂の発達) 小崩壊 落石 崩壊土
す べ り ひとつあるいは数箇所の面に沿い、せん断変位する運動形態をいい、円弧すべり面に沿う回転すべりや平面すべり面に沿うすべりとなる。また、くさび破壊は岩すべりの形態で、交差するいくつかの不連続面に沿って、これより上部のくさび状岩塊がすべる運動形態をいい、岩盤斜面に特有なものである。		開口亀裂 亀裂 植物根の引張 開口の伸展 雁行状亀裂 圧縮性亀裂 沈下・段差地形 新しい崖面 せり出し(ずれ) 新しい面 流れ盤構造 亀裂開口・凹地形 挟まれた岩片等 水平系亀裂
転 倒 移動岩塊に働く重力、近接ブロックの押す力または亀裂間の水圧に伴う転倒モーメントによって、移動岩塊の下端部を支点として前方へ回転する運動形態をいう。		ゆるみ 剥離 亀裂の開口 落石 傾斜 転倒 落石 亀裂の集中(キンダバンドの発達) 柱状節理岩体の鉤型亀裂の発生は転倒となる。
座 屈 節理や層理がほぼ垂直に発達している岩盤などで、節理や層理によって分離した板状または柱状の岩体が、その自重によって亀裂や劣化の箇所で座屈し、折れ曲がるように上部岩体ごと崩壊する形態をいう。		相対的な沈下 段差の発達 水平方向の微細な曲げ圧縮亀裂 圧縮性亀裂 曲げ引張り亀裂 上盤側のせり出し 開口亀裂(空隙) 急崖 高角度流れ盤 ないし垂直亀裂の存在

図 2.3.1 岩盤崩壊の形態別にみる前兆現象

前兆現象は、普通、亀裂の微小な開口や小さな段差であることが多いが、それが現れる位置や示す方向は、崩壊の形態とも密接に関係するため、危険なブロックの輪郭や崩壊形態を推定するうえで、これらの前兆現象の抽出はきわめて重要な情報となる。図 2.3.1 は、急崖で発生する岩盤崩壊の代表的な前兆現象を崩壊形態別に示している。これらの前兆現象によって、容易に崩壊機構が推定できるものほど危険度が高い岩盤崩壊ということになる。

＜調査範囲(1) 地域における崩壊パターンの把握＞

自然の崖面で発生する岩盤崩壊は、斜面における浸食現象での一つである。このため、その発生形態や規模だけでなく、頻度も、岩質(地質)や斜面の形状や規模を反映することが多いと考えられる。そして、この特徴は、しばしば同種の岩石、同様の地形を有する比較的広範囲に、類似の現象として現れる。ただし、ここでいう類似の現象とは、過去の崩壊地形や凹凸形状、という意味である。したがって、このような岩盤崩壊の地域的な特徴を調べ、ある程度崩壊の進行パターンを把握できれば、検出に際しての目安になるだけでなく、調査対象となった危険岩塊を、相対的に評価することも可能となり、対策への優先度を判定する材料ともなると考えられる。

図 2.3.2 は、豊浜トンネル崩落が発生した国道 229 号沿いの崖斜面で発生している崩壊を調査し、「自重落下」、「引っぱり亀裂進展型」、「トップリング型」、「引っぱり亀裂進展+すべり型」の 4 つに分類した例である[22]。自重落下型では、割れ目は下から上に進行し、オーバーハングも上へ進行する。このような条件のもとではオーバーハング下面から小中規模の崩落が発生する。引っぱり亀裂進展型は、自重落下型と異なり割れ目は上から下に向かって進展し、オーバーハング部全体が落下する。自由落下型の最終形と考えられ中規模クラスの崩落の原因になるものと推定される。落下岩塊の久保は、引っぱり亀裂進展型の方が自重落下型よりも大きい。トップリング型の場合、割れ目は上から下に進行する。崩落岩体の大きさはより大きなものとなる。一方、引っぱり亀裂進展+すべり型は、亀裂が多く発達するために生じるが、崩壊規模は前 3 タイプに比べると小さい。

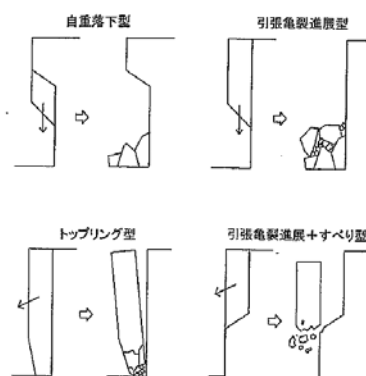


図 2.3.2 積丹半島における岩盤の崩落様式のタイプ

このような崩壊の特徴からみると、同じような急崖面でもさまざまなタイプの崩壊が発生していることがわかる。崩壊地形をこのようにパターン化しておくことで、次にどのような崩壊が発生するのかという箇所と規模の予測につなげられる可能性がある。このようなパターン化は、層雲峡でも行われている。実際の現場では、浸食や崩壊の過程でさらに複雑な様式を持つが、中規模崩壊を対象とした調査では、このような細かな崩壊地形の特徴を把握しながらブロックの抽出、危険度の推定を進めることが重要である。

＜調査範囲(2) 小規模崩壊、落石を想定した場合の調査範囲と留意点＞

一般に、岩盤崩壊の調査範囲は、急崖の前面とその直上部に限られる。しかし、写真 8～10 に示したような露頭の分布は、山岳道路の山側斜面の頂上付近にまで及ぶ。その比高差は、長野県や岐阜県、山梨県などではほぼ 100m 前後であるが、ときには 300m に及ぶ尾根筋に至ることもある。途中の沢筋には、図 2.3.3 にみるような、背後の露頭から分離した岩塊がみられることも多い。調査は、通常、1/25000 地形図と携帯 GPS により行われる。

落石や小岩塊の発生源は、地形図や空中写真で検出することは困難であり、実際に斜面を登って位置を地図上にプロットする他ない。その際、岩塊が落下中につけたと判定される木の傷、斜面上の衝突痕、そして写真に示す岩塊の形状や規模などが、調査の対象となる。これらをもとに、落石や岩塊の集中する落下ルートを検出することが目的となる。もし、落石シミュレーションを想定するのであれば、木々の密集度と衝突痕の程度、落下している岩塊の数と位置、特に対策工直上の斜面では突起した小露頭や切株の存在などの記録は必須である。

発生源での調査は、前述の緩み状態や不連続面など、いわゆる岩盤崩壊調査が主体である。このとき、抜け落ちの方向(不連続面の方向)とブロックサイズの特定が重要となる。

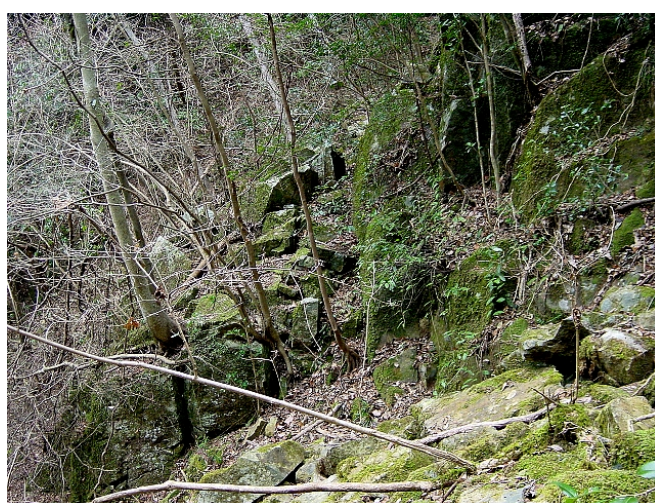


図 2.3.3 山頂部付近の崩壊した露頭。崩れた岩塊、分離しつつある岩塊が代表的ブロックサイズに相当する。

(2) 岩盤斜面の旧崩壊地形調査

調査は、一般に、崖面の地形的特徴を精査する段階と、地山内部の調査段階の、2つの段階に分けられるが、前節で述べたように、崖面の観察は最も重要である。このとき、もし地形図上あるいは一見して危険な範囲が特定できる場合には、直ちに地中部の調査に移ることになる。

岩盤崩壊が懸念される斜面は一般に急崖、高所であり、地形図上では崖マークに囲まれた空白であることが多い。このため、崖面に刻み込まれた微小な凹凸や不連続面との位置関係を正確に把握することは通常は難しい。しかし、近年では表 2.3.1 に示すような写真やレーザーを用いた非接触型式の測量法が発達している[4]。また、これらを、実機や模型ヘリコプターに搭載し、大スケールの地形図を作成することも容易となっている。

表-2.3.1 崖面の非接触調査法[6]

測量・計測・調査方法	可能な縮尺	利点	欠点
写真測量 (垂直空中写真)	1/2,500程度まで (樹木の影響のない場合より大縮尺可能)	広域的に測量できる。	樹木の陰となる部分やオーバーハング部の測量が不可能。
写真測量 (斜め空中写真)	1/100程度まで?	オーバーハング部にもある程度対応できる。	樹木の陰となる部分の測量が不可能。日陰も測量困難な場合がある。
写真測量 (地表から)	1/100程度まで?	同上(簡易なシステムあり)	同上
実地測量 (地表測量)	任意の縮尺	測定点は正確で信頼性高い	手間がかかる。急崖部は測量困難。
空中レーザー プロファイラー	1/1,000程度まで (測定誤差30cm~1m程度(樹木等の影響のない場合))	広域的面的に測量できる。多少葉がある場所でも地表を測量できる。図化に要する時間が少ない。	樹木の陰となる部分の測量が不可能。春~秋期は葉により精度が落ちる。急崖~オーバーハング部は測定困難(飛行方向による)
地表からの三次元 レーザー測定	1/11程度まで? (測定誤差数cm程度(樹木等の影響のない場合))	面的に測量できる。オーバーハング部にも対応。図化に要する時間が少ない。	樹木の陰となる部分の測量が不可能。測定距離が200~300m以内に限られる。

従来、空中写真から三次元の情報を再現するためには専用の図化機が用いられてきた。しかし、近年、複数方向からのカメラ画像をもとに三次元地形を復元するソフトウェアが開発され、これを用いて現地での観察結果をさまざまな角度から検討することが可能となった。この方法では、精度さえ保証できれば、不連続面の方向や間隔を計測することも可能である。ただし、例えば高さ 50m、幅 50m、奥行き 50m の立体のすべてを 35mm クラスの画像中の情報から cm 単位で読み出すためには、撮影位置と距離、評定点(ターゲット)の視認性など、多くの点に留意しなければならない。

図 2.3.5、図 2.3.6 は、いずれも模型ヘリコプターによる撮影画像をもとに作成した崖面の三次元画像である。(a)は、高さ 60m に及ぶ大規模危険岩塊の地形モデルであり、(b)も高さ 40m ほどの規模である。(a)は、全体の外形を把握するとともに不連続面の方向を考慮

してボーリングの配置を決定するために作成している[4]。一方、(b)は、この地形モデルから危険箇所を特定し、必要に応じて不連続面の方向(最大傾斜方向と傾斜)を求める目的で作成した[23]。図 2.3.4 は、準備した評定点であり、大きさは 50cm×50cm であり、必要に応じて平均して 10 箇所以上が必要である。特に注意しなければならないのは奥行き方向の精度であり、評定点もこの点に注意して配置する必要がある。



図 2.3.4 写真測量用評定点

画像から詳細なデータを得るためには、1)細部の点が測定できるような鮮明な画像を得る、2)一方向からの撮影画像のみでは凸部の裏側が見えないため複方向からの画像を得る、などの注意が必要となる。特に、2)の問題を解決するためには、複数方向からの画像を合成して三次元的立体図を作成できるソフトが必要となる。これには、平行撮影法に代わって収斂撮影法が用いられる。

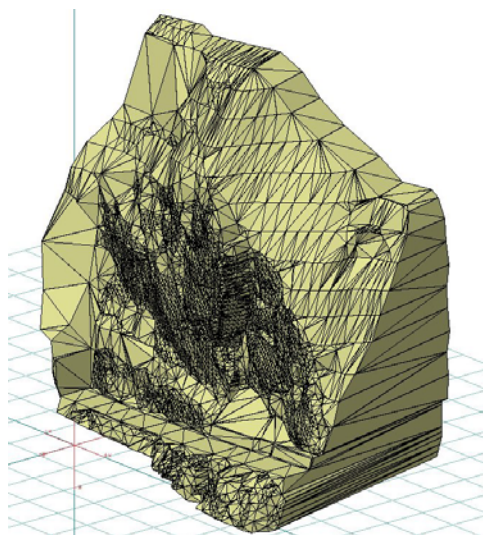


図 2.3.5 大規模崩壊の写真測量結果図

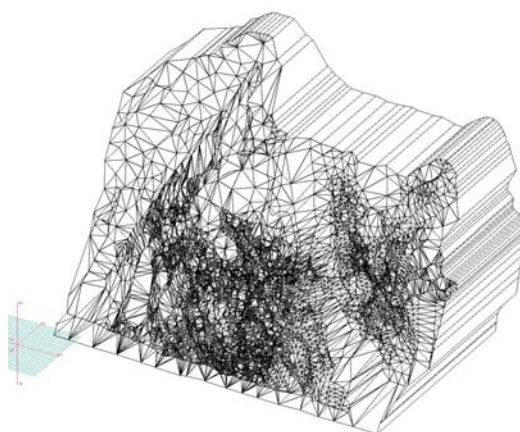


図 2.3.6 小規模崩壊に対する崖面の調査(写真測量結果図)

(3) 地中内部(不連続面と物性)の調査

地表面での観察結果をもとに、地中部への連続性や割れ目の発達、あるいは風化状態の確認を目的とした調査が行われる。調査の手法を表 2.3.2 に示した[6]。ここでもコア観察や、ボアホールカメラといった技術者の観察による調査方法が中心となる。物理探査は、急崖部でのセンサー設置が難しいことや、中規模以下の個別の不連続面に対しては必要な分解能が得られないなどの理由で、例えば破碎帯や亀裂密集部などのように割れ目の集中により岩盤物性が低下した範囲を確認する、といった明確な目的がある場合を除けば、用いられることは少ない。これに代わってエアトレーサー試験や真空透気試験のように不連続面の連続性を調査する試験法が注目されている。この方法でも不連続面の開口程度や経路まではわからないが、直接割れ目のネットワークを調査可能な方法であるため、今後の改良と進展が期待される。

表 2.3.2 地中内部の調査に用いられる手法[6]

調査方法	方法	利点	欠点
地表の目視観察	岩盤表面を直接目視で観察する。	面的かつ詳細に観察できる。	岩盤内部の状況は不明。
ボーリングコア観察	鉛直, 斜め, 水平などの方向にボーリングを行い, コアを観察。	地表の目視観察と同様に直接手にとって観察できる。	開口亀裂が密着した不連続面が判別困難
ボアホールテレビカメラ観察	ボーリング孔などにテレビカメラ, スキャナー, ファイバースコープなどを挿入して観察。	岩盤中の不連続面の開口量等が直接確認できる。	ボーリング孔周辺の状況しかわからない。
エアートレーサー試験	岩盤表面やボーリング孔などに煙などのトレーサー挿入して流出箇所を観察。	不連続面の連結性の確認ができる。	途中の経路は不明(別なボーリング孔で観察する方法あり)。
真空透気試験	ボーリング孔内から空気を吸引して漏れの程度からゆらみを測定。	ゆらみが定量的に測定できる。	ボーリング孔付近の状況しかわからない。
各種物理検査	弾性波(P,S)や電気を用いて孔壁を画像化する(各種方法あり)。	物性も同時に測定できる。	ボーリング孔付近の状況しかわからない。現状ではボアホールカメラ等より分解能低い。
物理探査	弾性波, 電気(比抵抗など), 重力などを用いて断面解析を行える。	面的に探査できる。	概略の傾向が把握できるが, 詳細結果は難しく, 他の調査手法との併用が必要。

ボーリングは、一般的な地質調査において最も多用される方法である。しかし、岩盤崩壊を対象とする斜面は一般に地形が急峻であり、その地形上の制約を受けることから、地すべりや土砂崩壊のように狙ったポイントで調査することは難しい。このため、ボーリングの方向や深度は、地表観察結果によって最も危険と判断された不連続面を確認するよう、必要に応じて斜めボーリングや水平ボーリングなどが行われる[3]。

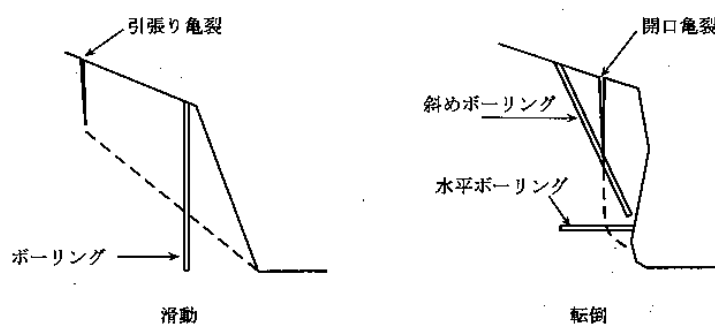


図 2.3.7 崩壊形態に着目したボーリングの断面配置[3]

図 2.3.7 は、断面的な配置を示したものだが、水平方向の分布を把握することも重要である。

ボーリングが行われると、通常はこの孔を利用してボアホールカメラ、あるいはボアホールスキャナーによる不連続面の調査が行われる。このようなボアホールカメラの結果と、危険ブロックの平面もしくは断面図と重ねあわせると、不連続面の地質的な位置づけやブロックの大きさが見えてくる。ボアホールカメラでは不連続面の方向、間隔、それに開口の状態しかわからないが、ボーリングコアからは不連続面の状態や挟在物の様子がわかる。このようにして、両者の情報と地形を合わせて総合的に判断することが重要である。

2.3.2 不連続面の調査法

(1) 岩盤崩壊規模と不連続面の規模

危険な岩盤斜面を概観すると，斜面全体を巻き込むような大規模崩壊，斜面中で発生する中規模崩壊，そしてせいぜい径が 1～2m 以下程度の落石程度の小崩壊といったように，規模の異なるいくつかの崩壊地形がみられることが多い．それぞれの崩壊に対して，断層や破碎帯，それに節理といった規模の異なるいくつかの不連続面が関与する．岩盤崩壊を対象とする調査では，まず対象ブロックの規模とそれにかかわる不連続面との関係を明らかにすることが重要である．

表 2.3.3 不連続面の工学的分類[24]

分類	地質学的分類	調査	試験	解析
小規模	鉱物盤開 鉱物粒子間割れ目 堅固（地積岩） 葉理 片理	鏡下 観察 薄断 論的調査	岩石試験 単一 不連続面の 原位置試験 室内試験	連続体解析 単一 不連続面の 連続体解析
中規模	連続性の高い片理 節理 鉱物脈 層理	決定論的調査		不連続体解析
大規模	シーム 脆弱層（堆積岩） 岩脈 断層 破碎帯			

文献[24]では，一般的な調査手法や試験の適用性を考慮して，不連続面を表 2.3.3 のように小規模から大規模間での 3 種類に区分している．ここでは，その存在自体が単独で岩盤斜面に影響を与える可能性のあるものを大規模不連続面，その存在が集合体として岩盤斜面に影響するものを中規模不連続面，また，その存在が岩石に影響するものを小規模不連続面と定義している．

岩盤崩壊の解析モデルを考える上で，大規模不連続面は，ほとんどの場合，地質調査結果にもとづいて決定論的に扱われる．また，小規模不連続面は，例えば岩石の異方性が問題となるような特別な場合(例えば付加体)を除けば，岩盤崩壊モデルでは無視される．調査とモデルの作成過程で，その扱いが最もやっかいなのは中規模不連続面である．

例えば，対象とする岩盤崩壊が明らかに特定の不連続面によって発生すると予想される場合には，その規模にかかわらず決定論的に扱われる．しかし，崖面に多くの中規模不連続面が分布し，それがいくつかの系統的な不連続面群として存在し，その卓越性が問題となるような場合には，統計処理結果にもとづく代表方向を決定し，それぞれの関係が崩壊ブロックにどのように関わるのかについて検討し，最終的に危険ブロックを決定する．調査結果にもとづいて決定論的に作成されるモデルを決定論的解析モデル，系統的に分布す

る不連続面を統計的に処理し、最終的にそれらのばらつきを考慮して作成されるモデルを統計論的解析モデルと呼んでいる[25].

ISRM(国際岩の力学連合会)指針では、不連続面を表 2.3.4 に示すように「幾何情報」と「力学・透水性情報」の二つに大別している。岩盤崩壊に関わる不連続面情報として重要なのは幾何情報である。

岩盤崩壊に関わらず、トンネル、ダムなどすべての岩盤構造物に共通する、岩盤の基本情報が、方向、連続性、間隔の 3 種類である。これらの情報をもとに求められるジョイントセットが、統計的な解析モデルの基礎となる。ブロックサイズは、この最終的な統計モデルの検証・確認として使われる。ただし、後述するように、トンネルや岩盤地下空洞での調査と異なり、不連続面により生じた凹凸が観察により明らかなことが多い岩盤崩壊では、方向とブロックサイズから、残りのトレース長や間隔を押さえていく方が合理的である。なお、表 2.3.4 に示した”位置”は、ISRM の基準にはないものであるが、調査結果をもとにモデルを作成する際には、その配置時に是非とも必要となる情報である。

表 2.3.4 ISRM で規定する不連続面情報

幾 何 情 報	位置	三次元的な不連続面の位置
	方向	二次元的な不連続面の方向
	連続性 (トレース長さ)	露頭部に見える不連続面長さ
	間隔	隣り合った不連続面の垂直間隔
	セット数	交差する不連続面群を構成する不連続面群(ジョイントセット)
	ブロックサイズ	交差し合う不連続面のそれぞれの方向と間隔によって決まる岩塊の寸法
力 学 ・ 透 水 性 情 報	粗さ	一つの不連続面における平均的な面を基準にとった時の表面粗さや起伏度
	壁面強度	割れ目の壁面を構成する岩石の圧縮強度
	間隙幅	空気や水で満たされている不連続面の両側の壁面間の垂直距離
	充填物	不連続面の両側の壁面に挟まれる物質
	浸透水	個々の不連続面あるいは岩盤全体に見られる水の流れと自由水

(2) 不連続面の幾何情報の取得

中小規模不連続面の調査法として最も知られているのがスキャンライン法やグリッド法(ウィンドウ法)である。この方法は、露頭を技術者が直接観察してサンプリングする方法で、その手順は確立されている。また、この手法では、間隙幅や充填物の状況や不連続面の粗さ、変位などの重要な情報も同時に得ることができる。しかし、不規則な凹凸の多い岩盤崩壊の調査では、このような直接的なサンプリング法を適用できる場所はほとんどない。変わって近年用いられるのが、写真やレーザー測量を用いた間接的方法である。前述のスキャンラインやグリッドとの違いは、間接的方法では力学・透水性情報を直接得ることができない点にある。

このこともあり、最終的な判定には、登坂調査などによる直接観察が必要となる。

①方向とジョイントセット

不連続面の方向は、不連続面の空間分布を特徴づける最も重要な要素である。節理などの不連続面では、多くの場合同じ方向性を持つ2方向以上の不連続面群が交差して存在する。同じ方向性を有する不連続面群をジョイントセットと呼んでいる。

方向を計測するために通常クリノメータと呼ばれる方位付き磁石が用いられる。計測点に近づけない場合には、走向板と呼ばれる硬い板を目測で所定の不連続面と同方向に設定し、この走向板の方向を計測する方法が用いられる。また、レーザーや写真などの間接法を用いた計測は、一度 CAD/CG 上に落として計測することになる。

結果の表示は、地質学では一般に走向・傾斜(例えば $N10^{\circ}E/E35^{\circ}$)を用いるが、岩盤工学ではコンピュータへの入力容易さから、傾斜方位角・傾斜角($010^{\circ}/35^{\circ}$)の組み合わせを用いる。

方向データは、図 2.3.8 に示すステレオ投影法で整理される。ステレオ投影法は、地質構成が比較的単調な海外の露天掘り鉱山などでは安定解析にも利用される。しかし、我が国は、地質構造が複雑で、構造運動や風化など多くの岩盤劣化要因を内在しており、主に結果の解釈において注意すべき点が多い。この問題を解決するためにも、プロットに際して不連続面をその成因や特徴別(開口幅や充填物、あるいは変位の有無)に区分しておくことが肝要である。

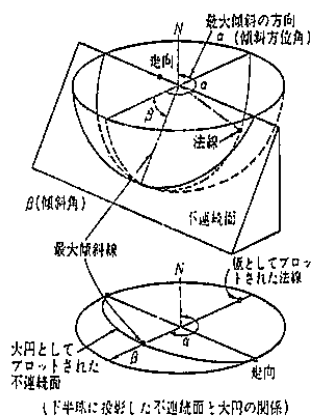


図 2.3.8 ステレオ投影図

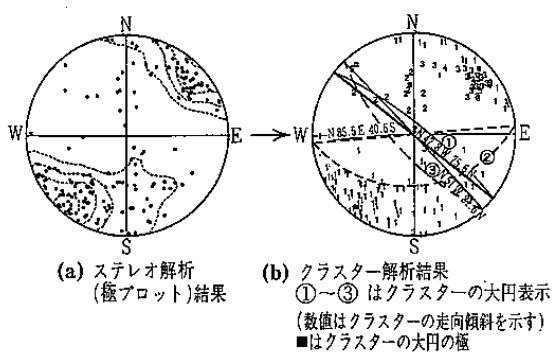


図 2.3.9 ステレオ解析結果とクラスター解析結果

現場で得られた数多くの方向データから、ジョイントセットを分類する作業も、ステレオ解析上で行われる。この解析作業には、地質技術者のサンプリング時の判断による方法と、卓越方向解析(クラスター解析)による方法がある。図 2.3.9 は、方向データの極プロットを行った後、クラスター解析を行った事例である。数多くのデータが得られた場合や、ボアホールカメラによる結果と地表面観察結果とを対比する場合などには有効な方法であ

る。

②連続性(トレース長)と間隔とブロックサイズ

連続性は、ある一つの面内での不連続面の長さ、あるいは面積の広がりという意味し、トレース長とも呼ばれる。崖面に刻まれた崩壊の規模をもとに危険範囲を予測したり、後述する解析モデルを作成するうえでもっとも重要なパラメータの一つである。微小な変形を扱う場合には、1.0m 以下の小さな不連続面も対象に入ることがあるとされるが、岩盤崩壊では、ブロックサイズ、すなわち崖面に刻まれた対象崩壊跡の一边の長さを参考に決定すればよい。例えば、写真 2.3.9 では、各辺の長さが各方向の不連続面の最小トレース長となる。また、崖面中の最大崩壊跡(通常は最も古い崩壊地形跡)から最大トレース長が求められる。なお、観察範囲より長い不連続面のトレース長については、周辺露頭の調査結果や、施工条件、例えば法面であればその法面全体以上の長さと考え、というように崖面の規模を考慮して想定することもある。

間隔もまた、崩壊ブロックの大きさから推定される。注意しなければならないのは、崖面で観察される間隔は見かけの間隔であるという点であり、これについては補正後、不連続面の真の間隔として記録する必要がある。統計的に処理する場合には、ジョイントセット毎の間隔として表示する。

収集されたデータは、トレース長、間隔ともに必要に応じてジョイントセット毎に記録して整理し、最大、最小値を求めておく。

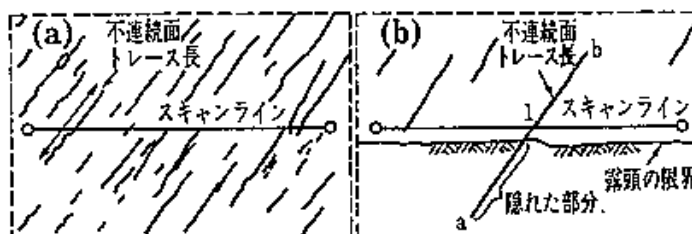


図 2.3.10 スキャンライン法の例

なお、岩盤崩壊に限らず、不連続面の方向、トレース長、間隔に加えて、不連続面間の連結関係が、後々の解析に置いて重要となることが多い。図 2.3.11 は、グリッドサンプリング時の不連続面の連結関係を記録したときの例である。重要なのは、この情報のなかに切った切られたの順位がつくことがある場合である。例えば、岩盤崩壊では写真に示すように、既にある方向に変位が認められる場合がある。このような不連続面では、右に示した X 字型ではなく、T 字型に解釈しなければならない(図 2.3.12)。

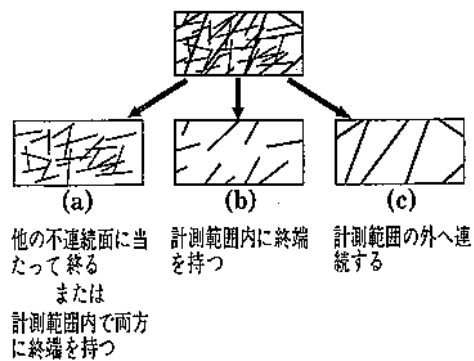


図 2.3.11 グリッドサンプリングの例

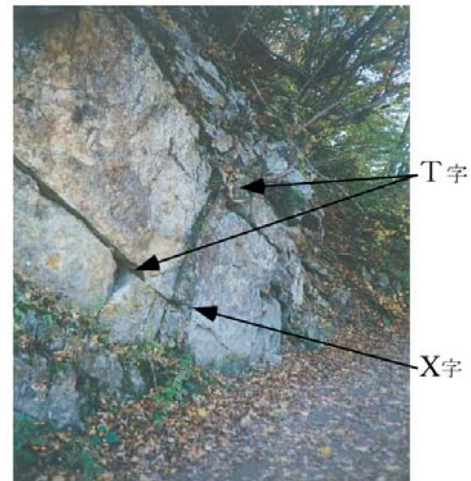


図 2.3.12 T字, X字割れ目の例

ブロックサイズは、一般的には前述のジョイントセットの数、連続性、間隔によって決定される値である(図 2.3.13)。しかし、岩盤崩壊の調査では、実は崩壊ブロックの大きさがもっとも重要である。これは、ブロックサイズが崩壊岩塊の最小規模、あるいは代表規模と考えられるからである。この点からすると、不連続面を計測してジョイントセットを抽出し、トレース長さと間隔を作成してブロックサイズを割り出す、という一般的な流れとは逆に、崖面中に刻まれた崩壊地形や落下した岩塊からブロックサイズを想定し、これをもとに、主要な不連続面の連続性と間隔を推定する方が効率的であり、より実際に近い(図 2.3.14)。

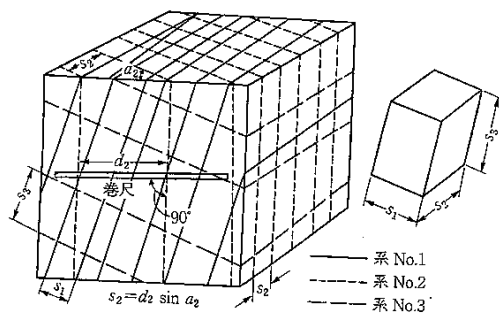


図 2.3.13 間隔とブロックサイズ

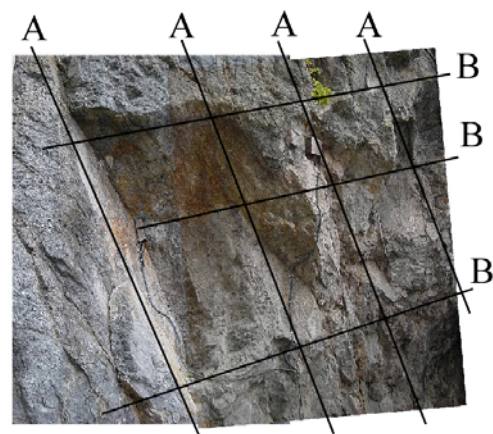


図 2.3.14 崩壊跡にみるブロックサイズ

2.3.3 岩盤崩壊のモデル化

岩盤崩壊のモデルを構成する基本要素は、地形、不連続面、物性の3つである。なかでも、地形と不連続面が、ブロックの幾何形状と安定度を想定するうえでの中心となる。

従来、不連続面を配置したモデルの作成法は、数値解析モデルの項で説明されることが多かった。しかし、岩盤崩壊の調査では、危険な部位を検出した後は、想定ブロックの力学的安定度を問うことが多い。もちろん、地中内部の状態を正確に把握することはきわめて難しい。しかし、地表の観察で経験的に危険と想定され、その一方で近隣に類似の崩壊地形の痕跡がある中規模以下の崩壊で、地表に関係する不連続面の一部が認められる、といったように条件が有る程度整うならば、地形と不連続面分布の調査結果をもとに危険ブロックの断面図を推定してみることも必要となる。

不連続面を中心とした岩盤モデルの作成法には、決定論的モデルと統計論的モデルが知られている。前者は、調査によって想定された不連続面を経験的に記述するもので、一方後者は、複数のジョイントセットからなる不連続面群をコンピュータの内蔵乱数を用いて一定の範囲に分布させて作成する方法であり、トンネルや地下空洞でしばしば用いられる。しかし、岩盤崩壊の場合、崩壊に関係する不連続面は何らかの形で、大小の地形の凹凸に表れていることが多く、しかもそれが地表で捉えられることが多い。この点を考慮すれば、少なくとも現段階では、ブロックの特定は決定論的モデルを中心に考えざるを得ない。

図 2.3.15 は、中井らが示した不連続面調査の手順[25]をもとに作成した、岩盤崩壊のモデル作成手順である。

本図は、まず既往の崩壊ブロックの調査に適用する。ついで、その結果をもとに、本フローを想定ブロックの調査に適用する。なお、本フローは、規模が大きく地質的背景の影響が大きすぎるものは想定していない。2.2 で述べたように、構造的な断層などの大規模不連続面は、多くの場合リニアメントとして検出可能であるため、空中写真の調査は必須である。一方、中小規模不連続面の調査は、微地形や凹凸の調査と一体であるため、写真測量やレーザー測量などによる調査が有効である。これにより、スタート時点で想定した崩壊ブロックに関係する不連続面群が有る程度想定できる。想定された不連続面とブロック規模との関係から、それぞれの不連続面の間隔と連続性を決定する。不連続面が複数想定される場合には、この段階で卓越方向解析を行い、抽出された順位と想定ブロックを形成する不連続面との関係を検討しておく。また、抽出された不連続面が大規模相当と判定された場合には、より連続性が長いと判定されるため、ブロックに与える危険度はより高いと判定される。以上の手順で、既往の崩壊跡から、関係する不連続面やブロックの特徴について検討する。

抽出された特徴をもとに、危険想定部位の調査を行い、想定ブロックに不連続面を配置して、その最大活動方向の断面を作成するとともに崩壊モードを推定する。このとき、周辺にみられないモードが検出された場合には、再度最初から見直すとともに確認する。

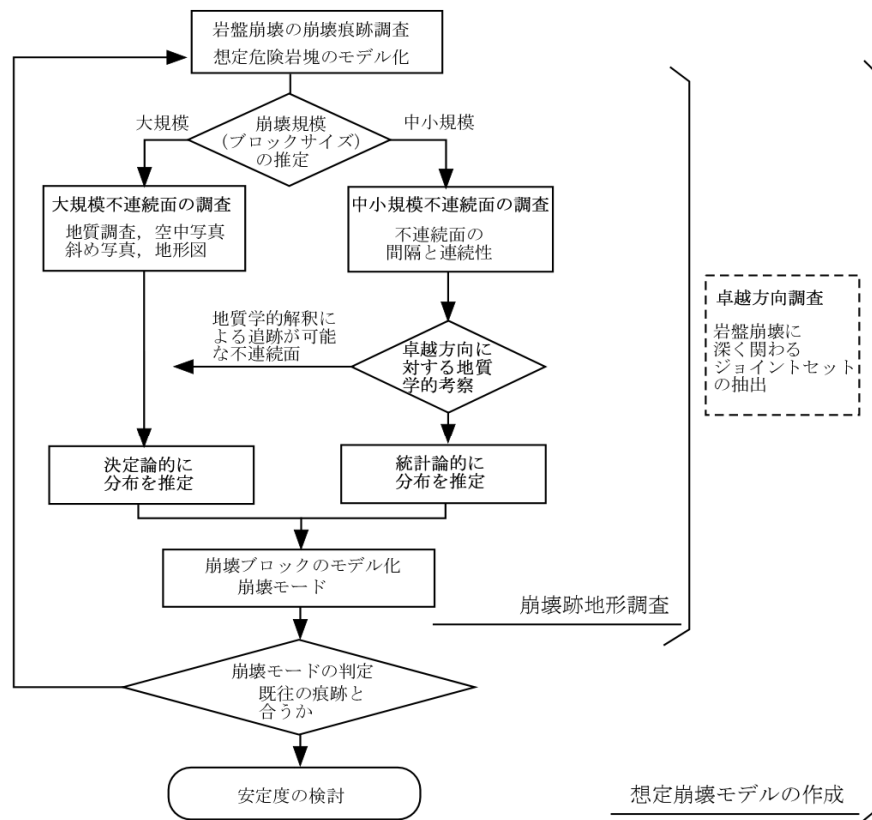


図 2.3.15 岩盤崩壊モデル作成の手順

ただし、危険なブロックを完全に孤立させる不連続面が、事前の調査ですべて明らかになる訳ではない。このため、多くの不連続面で囲まれたブロックの中から最も危険なブロックを想定する作業が必要になる。その際、不連続面の成因や分布の形状から想定される分布形状やせん断方向が、重要な想定材料になることは既に述べたとおりである。ただし、これらの形状や成因に関する情報は、それ単独でモデル形状決定の決め手になることは少ない。また、このような情報も、事前調査の時点で発生していない不連続面を予測しなければならないようなケースには今のところ役に立たない。

一方、このような調査結果に基づいて抽出された危険ブロックに対して、ボアホール調査を実施したとしても、普通は疑わしい不連続面がいくつも存在していてどれが崩壊を規定する主要な不連続面かを特定できない場合も追い。このようなケースでは、観察された複数の不連続面の中から、最も危険な不連続面(主崩壊面)を決定するために、力学的検討が行われることもある。

このように、決定論的モデルといっても実際には、推定した不連続面モデル自体に大きな不確定要因が存在するため、最終的に危険なブロックを絞り込むためには、いくつもの

ケースを想定した地質学的，岩盤力学的な検討が必要になる．このようなケーススタディに数値解析，特に不連続体解析は威力を発揮する．

現段階では，コンピュータで作成した後，不連続面の成因や現地の観察結果をもとにしてモデルを修正する作業も必要となる．しかし，このような方法で作成された統計論的モデルは，地中部での不連続面の分布をビジュアルに想定できるため，現地の観察結果から得られるイメージを具体的に表現するツールとしても有効である．実際の解析モデルは，これに大規模不連続面を決定論的に加えて作成される(図 2.3.16)．

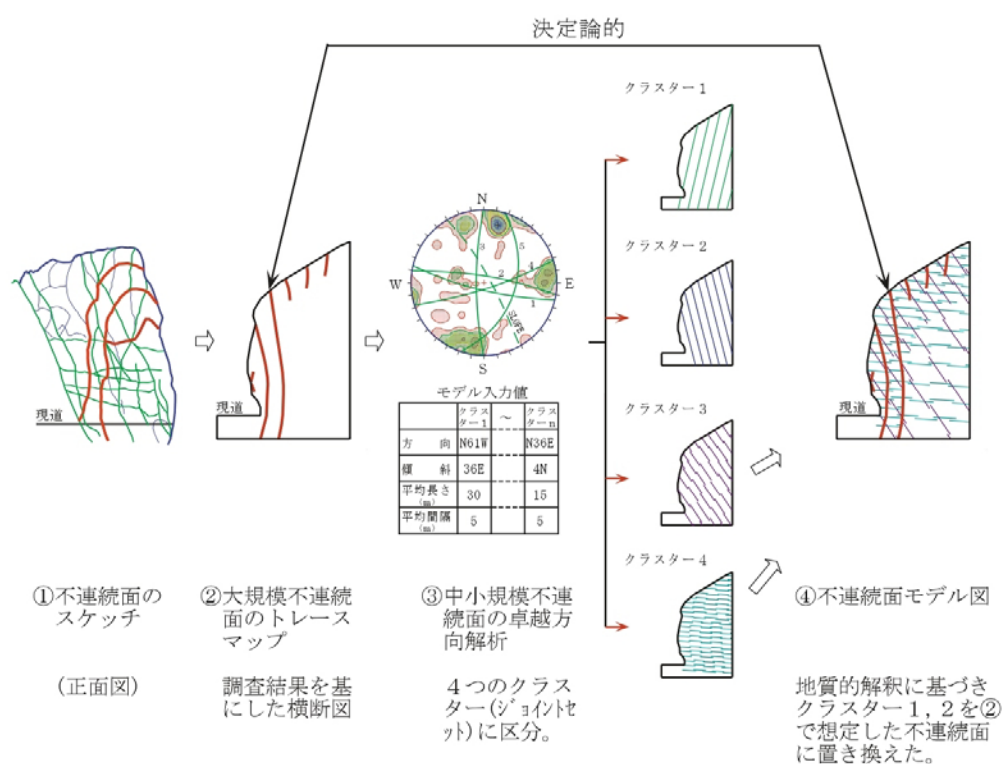


図 2.3.16 岩盤崩壊モデル作成の手順[25]

2.3.4 岩盤崩壊の危険箇所予測のための調査事例

岩盤崩壊に関わる調査のなかでは、地形面の凹凸に関する調査が重要であることを述べた。ここでは、このような凹凸の調査から危険ブロックの大きさを推定し、対策規模を決定した事例を述べる[23]。

図 2.3.17 は、崖面に刻まれた崩壊跡を斜め空中写真を用いて観察した事例である。地質は花崗閃緑岩であり、緩やかな曲面を持つ数枚の巨大なシーティング節理からなる。もっとも問題となったのは、シーティングジョイントを崩壊面とする中～大規模崩壊であるが、これについては近隣の類似斜面の調査から、その発生頻度はきわめて低いものと判断し、ここでは、崖下の道路と水路、隣接する人家への被害の影響と頻度が高い、シーティングジョイント表の岩板内での中～小規模崩壊に着目することとした。

＜危険ブロックの探索＞

本崖面を見たときもっとも目に付くのがシーティングジョイントの存在であるが、崖面内をよくみると、目立つ割れ目が少ないこと、崩壊跡はシーティング節理の境界部に多いことに気づく(図 2.3.18)。このような崩壊跡は、図 2.3.17 に示すように崖面内に 11 箇所ほど認められる。そこで、この崩壊跡の平均的な大きさを抽出するために、写真測量結果をもとに奥行き、天幅、側方を計測してヒストグラムを作成した。

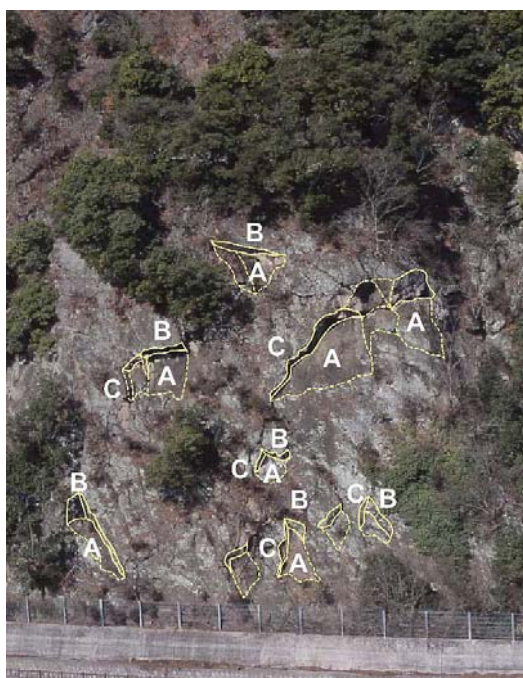


図 2.3.17 崖面中の旧崩壊跡

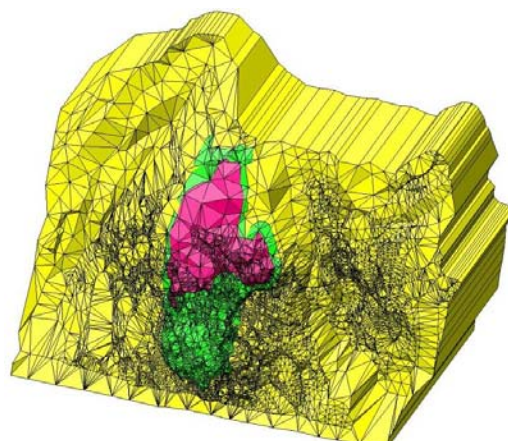


図 2.3.18 崖面全体を構成するシーティング
ジョイント(色別に示した境界)

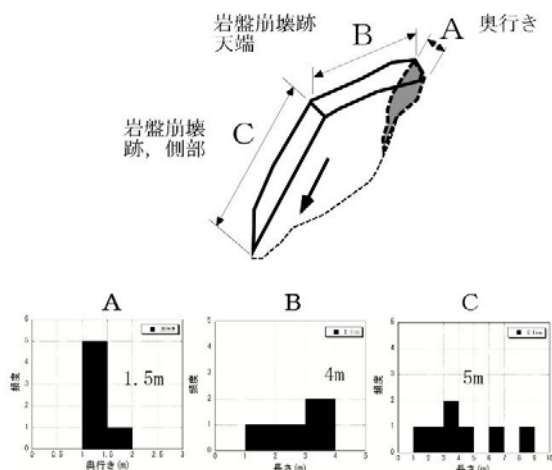


図 2.3.20 崖面中の崩壊の外形寸法

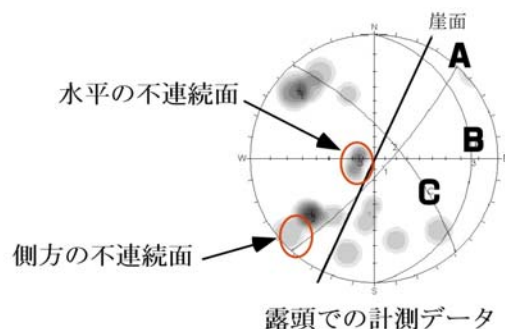


図 2.3.19 崩壊外形を作る不連続面のステレオ投影図

その結果、崩落岩塊の規模はおおよそ $1.5\text{m} \times 4\text{m} \times 5\text{m}$ であり、ボリュームはおおよそ $15 \sim 25\text{m}^3$ であることが明らかとなった。

一方、図 2.3.19 は、判読した旧崩壊地形の上部や側方部を一つの不連続面として計測し、それらの方向はステレオ投影図に表したものである。本図から、崩壊地背面が、崖面とほぼ平行な不連続面(シーティングジョイント)であること、側方や天端の割れ目の方向にも共通性がみられる。このことから、これらの割れ目は、崖面を構成するシーティング節理を切る、潜在的な割れ目の方向を示すものと考えられる。

調査地では、崖下の水路が構築された 30 年以前の資料がなく、その後の発生履歴も小規模なものにとどまるため、検出されたブロック崩壊跡が一度の崩壊によって刻まれたものか否かは不明である。しかし、崩壊規模と発生場所の特徴から、同規模の崩壊については発生機構が類似しており、類似の地形箇所でも現在も潜在的に進行している危険性は高いとみるのが妥当である。

<危険ブロックの探索>

既往の崩壊跡調査から明らかとなった規模を参考に、今度は登坂長によって、その周辺部の割れ目の調査を重点的に行った。その結果、空中写真では検出困難な微細な開口割れ目が崩壊の近傍で多数検出された。図 2.3.20 は、このような開口割れ目によって、今後崩壊が発生すると想定される危険範囲を示したものである。なお、特徴的だったのは、このような小さな割れ目は、旧崩壊地形の側方よりも斜面の上方に検出されることであった。また、この結果をもとに再度現地で割れ目の観察を行うと、崩壊跡地形では、上面に相当する面の方が側方に比べて風化が進んでいる。これらの観察結果から、崩壊は、崩壊によって残った崖面の上面に水平に近い割れ目が生じ、それが伸展すると側方に割れ目が生じる。そして、最後に引きはがされるように回転して落下する、という機構が想定される。



図 2.3.20 登坂調査によって検出された危険岩塊

本事例は、2 章で述べた平面的にみた場合の片側拘束解放の事例に相当する．類似のケースは他の地形，地質地域でも多くみられ，多くの場合崖面内で発生する岩盤崩壊は，ジョイントに左右される場合はもちろん，それ意外の要因であっても発生機構と規模は類似している．

したがって，崩壊跡の大きさは，その斜面で最も危険で頻度の高い崩壊規模と形態を表すものであり，一種のブロックサイズに相当するものと考えられる．

一般に，トンネルやダム基礎など，人工的に切り出した平らな面での不連続面の調査は，方向，連続性，間隔という順序で進められるが，岩盤崩壊の場合には，崩壊中に刻まれた凹凸の精査，あるいは落下した岩塊の規模等からブロックサイズに着目し，これをもとにセットとなる不連続のそれぞれの役割，危険な長さ（連続性），間隔を推定する方が現実的と考えられる．

このためには，これらを適切に表現できる CG が欠かせず，その測量法としての写真測量やレーザー測量のような崖面の凹凸を捉える調査法の存在がきわめて重要といえる．

2.4 岩盤崩壊および落石の危険度評価法の現状

一般に、斜面調査には、1)延長の長い路線や広範囲におよぶ地域に存在する危険な斜面を経験的に抽出して危険度を評価するケースと、2)危険度が高いと判定された特定斜面で、その危険度評価と適切な対策を行う調査の、2種類の段階がある。前者は、道路防災点検に代表される調査であり、抽出するための見識と経験が求められ、後者では個別の状況に適した調査法の選択と対策の有無や規模に対する評価が求められる。近年では、危険度のみならず、それ(崩壊)が発生した場合の社会的な損失影響も評価の対象となっている。

一方、岩盤斜面の安定性を評価する手法には、経験的方法と解析的方法とがある。経験的方法は、目視による点検結果や地表地質踏査結果や、調査計測データなどを総合的に検討して岩盤崩壊を評価するもので、解決判断が速いという利点もある一方で、結果が定性的で技術者の熟練度に左右されるという難点も指摘されている。しかし、いずれにせよ、前述のように初期の段階では経験的評価が中心となる。

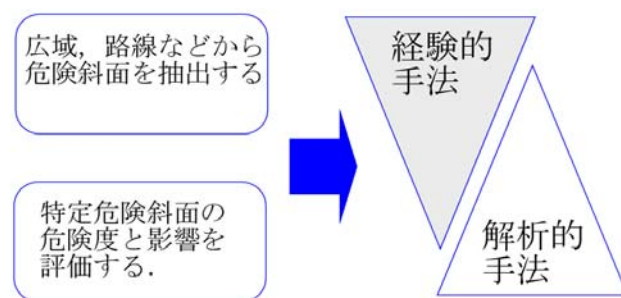


図-2.4.1 経験的手法と解析的手法の使い分けの現状

岩盤崩壊に用いられる、経験的な評価法には、ブロックの危険度を直接評価する方法、ブロックが崩壊した場合の評価法の2つがある。

(1) 岩盤ブロックの危険度評価法

ブロックの危険度を経験的に評価する方法には、岩盤分類による方法や斜面評点法などがある。

<岩盤分類法>

岩盤分類法は、岩盤の力学特性と相関が高くなるように岩盤をいくつかに分類する方法であり、切土勾配の決定から後述する解析時の物性推定に至るまで幅広く使われている。岩盤分類法には、ダム、トンネルなど個別の構造物建設を目的とした方法が確立されているが、現在もより一般的な分類を目指して基準化が勧められている。近年では、従来の岩石の硬軟などに加えて詳細な不連続面情報も追加されている。その一方で、風化するとその性質が大きく変化(低下)する花崗岩や蛇紋岩、シラスなどを評価する目的で別に作成さ

れた評価法もある。

ただし、岩盤分類法は、岩盤をマスとして判定する場合に有効な方法である。分離面を境界に相互に影響をおよぼし合いながら変位するブロックの危険度を判定する方法としては、変位がごく小さな初期の段階を除けば、適当とはいえない。

＜斜面評点法＞

斜面評点法は、道路防災点検[26]や急傾斜地点検などで用いられている。ただし、岩石崩壊は、落石や表層崩壊に比べて観察事例が少なく、数量化手法を用いることが難しい。このため、その点検項目は、研究者や技術者のブレインストーミングによって作成されている。

点検項目には、開口亀裂の規模、小崩壊や落石、岩質と亀裂の頻度、岩相、崖面と不連続面の傾斜関係、地形、地下水などがあり、これらの項目の評価点を加算した合計点を経験的に危険度が高いと評価される。この方法は、崖面中に存在が想定される大規模～中小規模の岩塊のうち、もっとも目立つ地形上の特徴に焦点を当てた方法であり、この方法によって危険度が高いと判定されると別途”カルテ対応”と呼ばれる継続監視へと移る[27]。

一方、海外においても類似の方法があり、例えば、Romana(1985)は、Bienawski(1976)のRMR(Rock Mass Rating)をもとに、SMR(Slope Mass Rating)と呼ぶ評点法を提案している[28]。

$$SMR = RMR + (F_1 + F_2 + F_3) + F_4$$

RMR は、①岩石の強度、②RQD、③不連続面の間隔、④不連続面の状態、⑤湧水の状況の5つの合計点であり、F1～F3は節理による調整評点でありF1が節理と斜面の角度、F2は節理の傾斜ですべりと転倒の判定、F3が斜面と節理の傾斜、また最後のF4は掘削方法を表している。SMRは、道路防災点検に比べると、不連続面による影響をより強く反映した方法といえる。

ただし、SMRも道路防災点検の方法も、崖面内に複数の危険箇所が存在する場合に、各値を平均値で点数化すると、最低値の箇所の危険性を無視することになり、逆に最低値を採用すると崖全体の危険度が必要以上に誇張される。このため、評点法の適用にあたっては、適用する規模の取り決めと、適用した箇所・範囲の具体的明示が重要である。

(2) 崩落岩塊の影響評価

崩壊した岩塊がどこまで到達し影響するかという問題は、防災上最も重要な課題である。ただし、岩盤崩壊は、対象とする規模の範囲が広く、崩壊高さやタイプによっても到達範囲が異なる。到達範囲を予測する方法として最も知られているのが、巨大な地すべり性崩壊を対象としてScheidegger(1973)が提案した等価摩擦係数法がある。ただし、ブロック状崩壊を対象とした方法は、今のところない。

a) 崩落岩塊の到達距離

図-2.4.2は、崖斜面の平均勾配がおよそ70度の急崖で発生した崩壊を崩壊タイプ別に、

崩壊高さと到達距離をプロットした図である。崖面の傾斜は、平面すべりで 73° 、くさびすべりで 55° 、複合すべりで 60° 、崩落型で 76° である。本図から、崩落岩塊の到達距離は、崖高さが 100m 以下であればおおむね崩落高さ以内となること、ただし崩壊形態がすべりになると、崩落高さが 100m を超えるあたりから高さの $1.2\sim 1.3$ 倍に達することがあることがわかる。ただし、崩落した岩塊の挙動は落下地点でのバウンドによっても変化するため、落下地点の形状には注意する必要がある[4]。

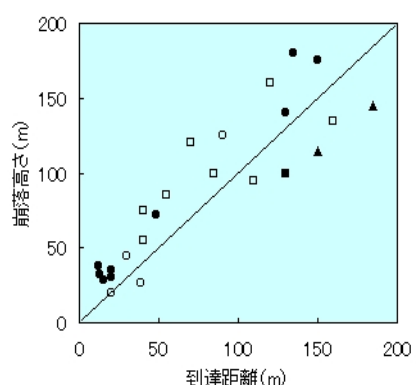


図 2.4.2 北海道における崩落岩塊の高さと到達距離の関係[4]

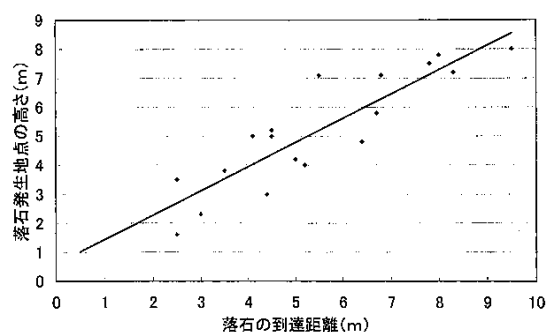


図 2.4.3 2000 年鳥取西部地震によって道路切土法面から発生したタイプ7の落石落下高さと到達距離

また、図-2.4.3 は、横山らが鳥取県西部地震時に、菅沢ダム湖沿いの道路脇斜面で発生した岩盤崩壊・落石について、落下高さと到達距離の関係で整理した図である。横山らは、落下した岩塊は転がることなく道路上に停止したものが多かったとしている[29]。その関係は、図-2.4.2 とほとんど同じで、落下高さと停止位置までの水平距離はほぼ $1:1$ である。このような関係は、1987 年の千葉県東方沖地震においても報告されている[20]。

しかし、同時に横山らは、長径 4.3m の崩落岩塊がも当初の落下高さは 5m であったにもかかわらず、 127m も落下した例をあげ、このような岩塊の到達距離は、岩塊の形状と落下経路の状態にもよるとしており、岩塊が比較的塊状に近く、地震時の水平慣性力で飛び出した後の斜面傾斜が 35° と比較的急で、比較的樹木の少ない谷、などの場合には注意が必要だとしている。

b) 落石現象に対する評価

岩盤露頭から岩塊が落下する現象は、落石として扱われることも多い。落石災害はその規模の違いと頻度の高さ故、岩盤崩壊とは独立して扱われており、通常「落石対策便覧の方法」あるいは「等価摩擦係数法」と呼ばれる経験的方法によって評価されている[30]。この方法は、危険箇所が数多く存在する我が国において、対策工計画位置での諸常数を簡易に見積もる上で大きな貢献を果たしてきた。ただし、その適用範囲は、地形条件が単純で、落石規模もせいぜい 1t 程度のものといわれている。

落石の速度は、さまざまな要因に左右されるが、なかでも最も重要なのが落下高さと斜

面勾配である。落石対策便覧の方法では、図 2.4.5(a)のような落石の動きを同(b)のように仮定し、図 2.4.5(a)の高さ H に対する終端速度を式(2.4.1)で表す。

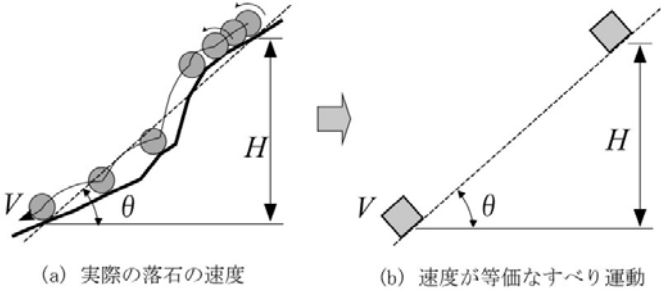


図 2.4.5 落石対策便覧の方法

$$V = \alpha \sqrt{2gh} \tag{2.4.1}$$

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \tag{2.4.2}$$

式 2.4.1 は、落石の跳躍やころがりといった斜面上での複雑な落下運動を、斜面上でのすべり運動とみなし、速度の減少の要因を摩擦に置き換えて表したものであり、 α は速度残存係数と呼ばれ、式 2.4.2 で表される。

一方、式 2.4.2 中の μ は等価摩擦係数と呼ばれる。 μ は、崖錘や岩盤などの斜面性状によって異なるとされ、設計には一般に表 2.4.1 が用いられる。

表 2.4.1 斜面構成材料別の等価摩擦係数

区分	落石および斜面の特性	設計に用いる μ	実験から得られる μ の範囲
A	硬岩, 丸状, 凹凸小, 立木なし	0.05	0.0 ～0.1
B	軟岩, 丸状～角状, 凹凸中～大, 立木なし	0.15	0.11～0.2
C	土砂, 崖錘, 丸状～角状, 凹凸小～中, 立木なし	0.25	0.21～0.3
D	崖錘, 巨礫混じり崖錘, 角状, 凹凸中～大, 立木なし～あり	0.35	0.31～

当初の落石対策では、対策位置での跳躍量と速度、すなわち対策工規模の計画に主眼がおかれた。そこで、一般には、等価摩擦係数は最大 0.35、跳躍量も 2m 以下であるとして、全国的な対策が急ピッチで進められた。以後、これらは落石対策便覧の方法、あるいは等価摩擦係数法と呼ばれ、我が国の落石防災対策の基本となった。しかし、図 2.4.5 をみればわかるように、本方法は、落石発生源から落下停止地点までを一つの単純な斜面に置き換えただけの簡便式であるため、途中に大きな傾斜変換点がある場合や、斜面上部と斜面下方とでは経路の材質が大きく変化するような斜面はもともと想定していない。

近年、落下岩塊の規模が想定より大きい、あるいは速度が大きい、さらには対策工を飛び越えて(すなわち跳躍高さ>2m)事故に至るケースも増えている。このうち、跳躍については、その多くが斜面中の突起物(樹木の切り株や転石)への衝突したことによる予測困難な跳躍が原因とされるが、通常の場合であっても高さは3m~5mに達する場合のあることがその後の落石実験から明らかとなっている。

1973年に行われた落石実験の結果が図2.4.6である。本例での最大跳躍量は、そのほとんどが1m以下であり、一つの例外を除いて2m以下となっている。これが、2mの根拠となっている[31]。

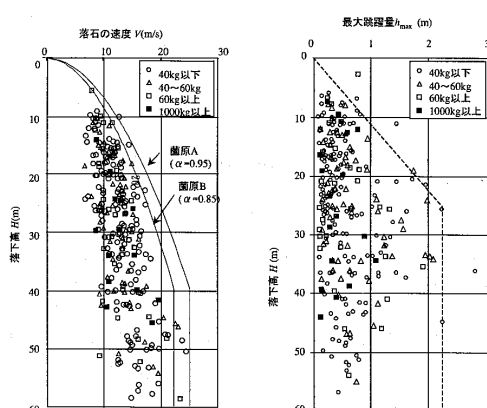


図 2.4.6 落下高さと跳躍量の関係

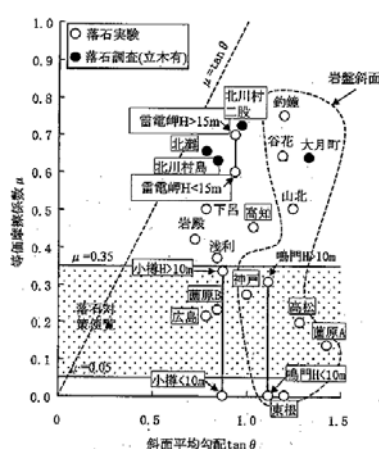


図 2.4.7 落石実験結果にみる等価摩擦係数

一方、図2.4.7は、斜面の傾斜角と等価摩擦係数の関係を、既往の現場落石実験から示したものである。表4.1.1では、等価摩擦係数の最大は0.35とされているが、実験結果ではその多くが0.35以上を示し、最大は0.8近くにまで達している。右城らは、1990年10月に徳島県鳴門市で発生した落石事故において、その等価摩擦係数は $\mu=0.66$ であったと報告している[32]。また、2003年5月に発生した高知県吾北村大渡で発生した落石災害においても、等価摩擦係数には1.0を超えるものがあったことを報告している。右城らは、これらの結果をもとに、等価摩擦係数は斜面特性を表すものではないことを指摘すると同時に、これまでの実験結果から、落石が $\theta=35^\circ$ 以上の斜面で発生する場合には μ は0.6~1.2に達すると述べている[33]。

落石対策便覧の方法は、落石対策位置での速度(ないしエネルギー)や跳躍高さを一律に規定するものではないため、使用にあたっては十分な注意と経験が必要である。

(3) 岩盤崩壊と落石評価法の現状

経験的評価法を中心に、ブロックの危険度評価、崩壊後のブロックの到達距離の評価法

について述べた。経験的方法は、目視を中心とする地表の調査結果や計測データを総合的に検討して岩盤崩壊の危険度を評価するもので、解決への判断が速いという利点がある。その一方で、結果が定性的で技術者の熟練度に左右されるという難点も指摘されているが、調査の初期段階、特に検出段階ではこのような経験的評価が中心であるため重要である。その精度を上げるためには、2.2 で述べたような崩壊の素因に関する経験則の蓄積が重要であるが、今のところこの部分に着目した研究は、残念ながらそれほど多くない。一方、現在では、初期の検出の段階でも、それが崩壊した場合の影響評価は求められる。図 2.4.1 に示した経験的な図表と落石対策便覧の方法とが、対象規模の違いと落下経路の状況に応じて使い分けられている。近年では質点解析法などのシミュレーション手法の導入も始まっているが、手法の適用に関する境界は曖昧で、現在でも数 t～数 10t 規模で、落下経路が長く複雑な場合は、これらの手法間のグレーゾーンとなっている。この間を埋める予測評価手法の確立が望まれている。

2.5 第2章のまとめと本研究の目的

第2章では、岩盤の急崖斜面で発生する崩壊の特徴と実態と、その発生要因(素因・誘因)について概説し、その調査の方法、評価の現状を述べた。

日本列島は、今なお隆起を続ける変動場にあり浸食活動が活発である。浸食前線では急崖、遷急線、オーバーハングなどの地形が生成され、数多くの岩盤崩壊の発生場が形成されている。近年発生が続いた海岸部の急崖で発生する大規模なブロック状崩壊も、地史的にみれば、活発な浸食活動の一つと考えられている。このようななか、岩盤崩壊といえは豊浜トンネル(1996)、第二白糸トンネル(1998)などの大規模崩壊ばかりが注目されがちであるが、山腹斜面の中腹から山頂部にかけての広い範囲に点在する、小規模な露頭を発生源とする落石災害も無視できない。なぜなら、一つ一つの被災規模こそ小さいものの、その発生範囲は全国の山岳地帯に及び、その発生頻度も高いためである。本章では、このように規模によって大きく異なる岩盤斜面の崩壊を、表 2.5.1 のように3つのカテゴリーに区分した。現段階での調査と対策技術を考慮すると、残念ながら対応可能なのは、せいぜいカテゴリー2と3のみ、規模にすると大きくても 500m³ 以下である。

表 2.5.1 岩盤斜面で発生する崩壊規模と対応の区分

(岩盤斜面ハザード委員会 H19.10 に加筆)	
カテゴリー1	大規模だが発生頻度は低い。 規模は確認できても予測は困難。
カテゴリー2	中小規模で発生頻度はやや高い。 調査による評価が可能。
カテゴリー3	小規模だが発生頻度は高い。 調査による評価が可能。

一方、岩盤斜面で発生する崩壊の調査は、危険箇所の検出と、想定される素因と誘因に基づく発生危険度、そして被災想定を目的としている。図 2.5.1 は、その種類と評価までの過程をフローにして示した図である。本来、素因、すなわち崖面の凹凸とそれにかかわる不連続面の調査で少し広めに網をかけ、崩壊形態を推定したうえで、計測等によって確定する、というのが発生源での危険度評価での理想である。しかし、図 2.5.1 に示したように、現段階では危険なブロックを直接、長期間にわたって監視する技術が確立されていないため、崩壊時期を計器監視によって予測することは困難である。このため、今のところは素因の調査のみによって危険度を評価し、予測しなければならない。しかし、これまでは危険で近づくことが難しく、望遠によるスケッチや写真のみで行う他なかった調査も、現在では写真やレーザーによる調査法と三次元コンピュータグラフィクスを用いて、細部の検討が可能になっている。「北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会」が行ったように、急崖中にみられる崩壊跡地形と不連続面との関係は、急崖斜面での崩壊による浸食の進行を予測するうえで貴重な情報となる。本研究でも、これらの機器を活用して、

<空白>

2 章 参考文献

- [1] 土木学会：大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会報告書，1997.3
- [2] 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，1994
- [3] 土木学会：岩盤斜面の調査と対策，1999
- [4] 土木学会：岩盤崩壊の考え方-現状と将来展望-[実務者の手引き](CD-ROM 版)，2004
- [5] 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会：北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会報告書，2000,10
- [6] 地盤工学会北海道支部：岩盤崩壊の発生機構と計測技術，2000,12
- [7] 北海道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会：北海道での岩盤計測に関する調査技術検討委員会中間報告書，2001.
- [8] 一般国道 229 号第 2 白糸トンネル崩落事故調査委員会：一般国道 229 号第 2 白糸トンネル崩落事故調査委員会報告書，2000.
- [9] 豊浜トンネル崩落事故調査委員会：豊浜トンネル崩落事故調査報告書，1996,9
- [10] 一般国道 305 号岩石崩落災害調査委員会：一般国道 305 号岩石崩落災害調査報告書，H2 年,3
- [11] 宮崎数礼，安原一哉，村上哲，佐々木康子：海岸崖浸食における崖の圧縮強度と浸食速度の関係，土木学会第 50 回年次学術講演会，pp670-pp671.1995.
- [12] 川本眺万，藤田益夫：自由斜面の変形と応力状態について，土と基礎，1968,8
- [13] 狩野謙一，村田明広：構造地質学，朝倉書店,1998.
- [14] 地盤工学会：切土法面の調査・設計から施工まで，1998.
- [15] 岡崎健治，伊藤佳彦，榊原正幸，中川伸一，日外勝仁：付加体地域の道路斜面にみられる岩石の風化形態とその考察-常呂帯仁頃層群分布地域での調査事例-，寒地土木研究所月報，No.636,pp23-pp31,2006.5.
- [16] 城間博通，赤木渉，岡部幸彦，中西昭友：支保実績から分析した弾性波速度評価の一考察，トンネルと地下，Vol.33,No.9,2002.
- [17] 小玉斉明，藤井義明，赤川敏，石島洋二：氷点下における数種の岩石の強度変化と諸物性値の関係，資源・素材発表講演資料(室蘭)，pp65-pp66.2005
- [18] 中島巖，根岸正充：節理構造岩盤斜面における落石の発生機構-寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究(第 3 報)-，応用地質，Vol35,No.3，pp11-pp21，1994.
- [19] 釜井俊孝：1987 年千葉東方沖地震による上総丘陵の斜面崩壊－崩壊の分類と安定の検討－，地すべり，Vol.26, No.1, 1987.
- [20] 釜井俊孝，野呂春文：1987 年千葉東方沖地震による上総丘陵の斜面崩壊－分布と形態について－，地すべり，Vol.29, No.4, 1988.
- [21] 小山内信智，栗原淳一，藤沢和範，花岡正明：地震に起因する土砂災害対策の現状と課題，土木技術資料 47-12,2005.

- [22] 米田哲朗, 林謙二, ダカール ゴネス, 柏谷公希, 金子勝比古: 北海道積丹半島における火砕岩の特性と岩盤崩壊の要因について, 地すべり, Vol.39.No.1, pp14-21, 2002
- [23] 藤森克也, 巧刀忠昭, 望月優, 赤松太, 島内哲哉, 酒井直樹: 急崖上部に位置する崩落危険岩塊の調査と評価, 応用地質学会 H16 年度研究発表会講演論文集, 2004, 10.
- [24] 地盤工学会: 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, (社)地盤工学会, 岩の力学委員会, 1995.
- [25] 中井卓巳, 島内哲哉: 3.不連続面の調査と評価(その 1), 土と基礎 講座「不連続性岩盤の調査・解析と評価」, Vol.48, No.1, pp57-62, 2000.1.
- [26] 道路防災点検要領: 平成 8 年 8 月, 道路保全技術センター, 1996.
- [27] 防災カルテ作成・運用要領: 平成 8 年 12 月, 道路保全技術センター, 1996.
- [28] Romana, M.: New adjustment rating for application of the biniaowski classification to slopes, Proc. Int. Symp. Rock Mech., Min. Civ. Works, ISRM, Zacatecas, Mexico, pp.5963, 1985.
- [29] 水口真一, 藤田勝代, 嘉茂美佐子, 横山俊治: 2000 年鳥取県西部地震による落石特性, 第 40 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.509-512, 2001.
- [30] (社)日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.
- [31] 古賀泰之, 右城猛, 小村辰彦: 4.落石運動のメカニズムと予測(その 1), 地盤工学会 講座「落石対策」, Vol.50, No.4, pp.68-73, 2002.
- [32] 右城猛, 玉井佐一, 明坂宣行, 山岡幸弘, 八木則男: 高知県における落石災害と落石の運動特性, 土木学会論文集, No.581/VI-37, pp.39-48, 1997.
- [33] 大久保政利, 内原伸司, 藤井淳哉, 片田博士, 右城猛: 現地に残された痕跡からの落石運動の推定事例と考察, 土木学会, 第 6 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2002.
- [34] 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊メカニズムについて, 地質と調査, Vol.3, pp9-pp15, 2002.
- [35] 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊と落石問題に関する現状と課題, 地すべり, Vol.39, No.1, pp1-pp13, 2002.

第 3 章 岩盤崩壊および落石問題への数値解析手法の適用性に関する研究

3.1 岩盤崩壊問題に適用される解析手法の種類

岩盤崩壊が発生する都度，いろいろな調査が行われ，さまざまな解析を通じて崩壊原因の解明が試みられてきた．崩壊はどこから始まったのか，どういう順序で崩壊したのか，その原因は何かという現象の説明である．解析によって，実際に生じた崩壊事故例をもとに，きっかけとなった誘因(地震や水圧，強度の低下などによる崩壊駆動力)を推定し，メカニズムを解明することで崩壊原因を明らかにし，後の防災・減災対策に活かすことが目的である．現在，岩盤崩壊問題に適用される解析手法を大別すると，図 3.1.1 のように区分される．

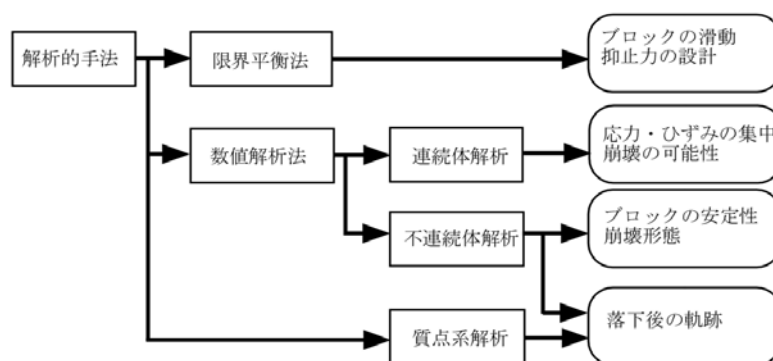


図 3.1.1 岩盤崩壊に用いられる解析手法の種類[2]

限界平衡法は，滑動タイプを中心に用いられるが，希にトップリング解析にも援用される．一方，従来は崩壊後のメカニズム解析を中心としていた連続体解析は，崩壊機構の予察にも用いられるようになっている[1][2]．しかし，不連続体解析法は，複雑な地形と不連続面の配置が難しいためか，崩壊後のメカニズム解析には用いられるものの，事前の安定度の評価に適用した例はみられない．これに対し，従来は質点解析法を中心としていた落石分野を中心とした，崩壊後の岩塊の影響評価に適用した解析事例は急増している．

本節では，これらの各解析手法の概要と適用について述べ，次節で本研究の中心である不連続変形法(DDA)について詳述する．

3.1.1 限界平衡法.

限界平衡法は，岩盤崩壊形態のうち主に滑動形態の解析に用いられる．岩盤ブロックを剛体とみなし，その滑動力と抵抗力，あるいは滑動モーメントと抵抗モーメントの比を安全率と定義することでブロックの安定度を評価する方法である．対策に必要な抑止力を簡

単に得られるため、安定度評価法の中心であり実績も多い。地すべりでの解析同様、現状の安全率を限界平衡状態とみなして $F_s=1.0$ と仮定し、これに 10～50%の抵抗力を付加することで抑止力を得る方法であり、現状の安定度評価というよりも最初から設計規模を算出するための方法として活用されている(図 3.1.2)。

限界平衡法には、平面すべり解析、クサビすべり、円弧や複合円弧すべり解析などの種類があり、適用例も多い。もっとも簡単な利用例としては、突出したブロックを切る不連続面について、一面せん断試験の結果をもとに、その強度が全面積に働く場合、粘土等の介在に対して 50%程度にまで低下した状態場合を求め、対策の有無を検討した例などもある[5]。2章で述べたように、過去の崩壊事例から、崩壊面が 50%まで風化、開口が進むと崩壊に至る、という経験則を基において検討事例であり、簡単で実用的である。

一方、この方法で岩盤解析に特化した手法にキープロック解析がある。地中に分布する不連続面の関係から危険ブロックを抽出する作業は、ステレオ解析法やキープロック理論にもとづいて行われる[1][3]。計測された不連続面の走向・傾斜データをもとに、地中に分布する複数の不連続面と自由面との関係から移動可能なブロックを、解析的に探索する方法であり、トンネルや地下空洞では不連続面のばらつきを考慮した確率論的抽出法が適用されるが、岩盤斜面では技術者が自らの調査によって抽出することもある[4]。抽出後の安定度は、限界平衡法により計算される。ただし、自然の岩盤斜面を対象とする場合に、あまり地形の起伏が大きい崖面を対象とした解析は難しい。

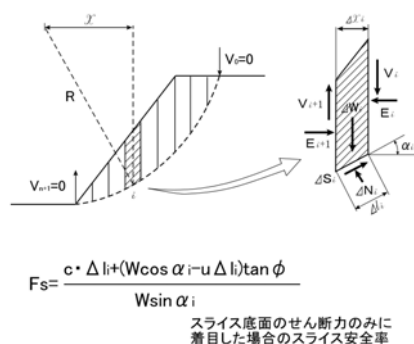


図 3.1.2 円弧すべり解析の例

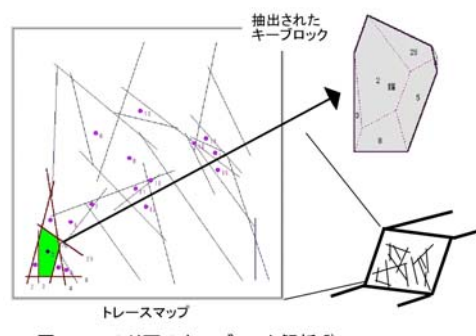


図 3.1.3 のり面のキープロック解析例[3][4]

3.1.2 数値解析法

岩盤崩壊の解析に用いられる数値解析法は、主に不連続面の扱い方によって連続体解析と不連続体解析に大別される(表 3.1.1)。連続体解析法としてもっとも知られているのが等方均質体を扱う有限要素法(FEM)であり、岩盤を対象とした解析でも多くの実績がある。これに対し、不連続面による影響を考慮するために、要素内に不連続面による異方性を定義するよう改良した等価連続体解析法と呼ばれる方法もある。

表 3.1.1 連続体解析と不連続体解析[2]

連続体解析法	対象岩塊を巨視的にとらえ、その領域内での不連続性による力学特性を等価な連続体に置き換え、破壊、変形状況を解析する手法。破壊時、破壊後の挙動を問題とするような大変形は扱いにくい。
不連続体解析法	対象岩盤中の個々の不連続面を評価し、岩盤を複数の岩盤ブロックからなる不連続体とみなし、破壊後のブロックの挙動、影響範囲、破壊のメカニズム等を解析する手法。大変形を扱える。

3.1.2.1 連続体解析.

1) 連続体(等方性解析)

連続体解析は、斜面内部を微少な要素の集合体で表現し、それらの要素間の力の釣合いや変位から、局所的な破壊・変形領域を求める方法である。もともと、ブロックが分離して動くような挙動は想定しておらず、斜面全体の安定性を評価する目的で用いられる。

有限要素法はその代表であり、多少の異方性があっても不連続面が一様・均一に存在すると仮定できる岩盤斜面において、地形や物性の違いによる岩盤内部の応力やひずみの偏在・集中などを、簡易かつスピーディに知りたい場合に用いられる。不連続面による異方性の影響を直接表現することはできないが、ジョイント要素を用いれば、断層やシームなど、決定論的にモデル化が可能な不連続面を扱うことができる。

三次元有限要素法が普及してきた現在、大規模崩壊の進行を、弱層部の強度低下の側面から推察するといった利用も行われている[5][7]。

2) 等価連続体解析(異方性解析)

岩盤内に存在する不連続面群を統計的に処理し、不連続面の方向、連続性(長さ)、間隔を直接入力パラメータとする方法であり多くの方法がある[3][8]。手法によって相違はあるが、その多くは不連続面を、図 3.1.3 に示すように岩石部分(母岩とも呼ぶ)と、複数の不連続面群の組み合わせとして扱っている。最終的な岩盤の変形は、それらの総和で表される。



図 3.1.3 節理群を含む等価連続体解析の変形

この方法は主に系統的に分布する複数の不連続面群(ジョイントセット)からなる岩盤を扱うことを前提としている。したがって、断層やせん断帯など、不規則に存在する不連続面については、これとは別に考慮しなければならない。トンネルや地下空洞などでの変形問題を中心に適用されているが、掘削斜面の変形を扱った例もある[9]。

等価連続体解析の特徴は、不連続面が要素内に定義されていることである。このため、要素内の不連続面による影響は、現地の岩盤と同等のスケールでモデル化する必要がある。

この考え方は、代表要素容積(Representative Elemental Volume)と呼ばれ、不連続面を扱う解析において重要な考え方の一つとなっている[8].

3.1.2.2 不連続体解析法

岩盤を不連続面で区切られたブロックの集合体と見なし、相互の力学的挙動をブロックどうしの接触を通じて解析する方法である。この方法には、川井(1977)による剛体バネモデル(RBSM)、カンドール(Candall,1971)による個別要素法(DEM Distinct Element Method)、シー(G.H.Shi,1984)による不連続変形法(DDA: Discontinuous Deformation Analysis)、マニホールド方(MM:Manifold Method)などがある(表 3.1.2)。

表-3.1.2 不連続体解析法の種類

手 法	特 徴	解析区分	不連続面の剛性	適用例	提案者
離散FEM	三次元FEM(DYNA-3D)が知られている。衝突解析、爆破解析など多くの機能を持つ。	動的大変形	kn, ks	衝突、爆破解析 トンネル崩壊 断層の解析	Halliquist et al (1985)
剛体バネモデル(RBSM)	各要素間の境界に設定された、せん断および垂直方向のバネに集中する表面力を評価。 差分法とFEMの中間的理論。	静的 微小変形	kn, ks	クラックの進展 破壊パターン解析 斜面のすべり解析	川井(1976)
個別要素法(DEM)	岩盤を不連続面に囲まれたブロックの集合体と考え、各ブロックの運動方程式を差分法で解く。 粒状体解析など多くの研究がある。	動的大変形	kn, ks	岩盤崩壊、落石解析、トンネル、地下空洞の安定解析	Cundall(1971)
不連続変形法(DDA)	岩盤を不連続面に囲まれたブロックの集合体と考え、各ブロックの運動をFEMの型式で解く。 粒状体解析の研究もある。	動的大変形	kn, ks	斜面、トンネル、基礎の安定解析、岩盤崩壊、落石解析。	Shi(1984)
マニフォールド法(MM)	FEMとDDAを組み合わせた方法。岩盤ブロックの挙動を物理メッシュで、ブロックの変形を数学メッシュで表す。個々のブロック内部の応力、ひずみをみることができる。	動的大変形	kn, ks	斜面、空洞解析、熱応力解析、変形・浸透流連成解析 クラックの進展	Shi(1991)

kn:垂直剛性
ks:せん断剛性

開発当初、ブロックを剛体として扱う方法が多かったが、現在ではほとんどのソフトで弾性変形を考慮することが可能であり、各解析手法間の本質的な違いはなくなっている。

不連続面の挙動(開口、閉合、滑動)や接触時の機構は、モデル(手法)によって少しずつ異なるものの、基本的には、閉合と滑動を、それぞれ垂直方向と接線方向バネによって表現している(図 3.1.4)。

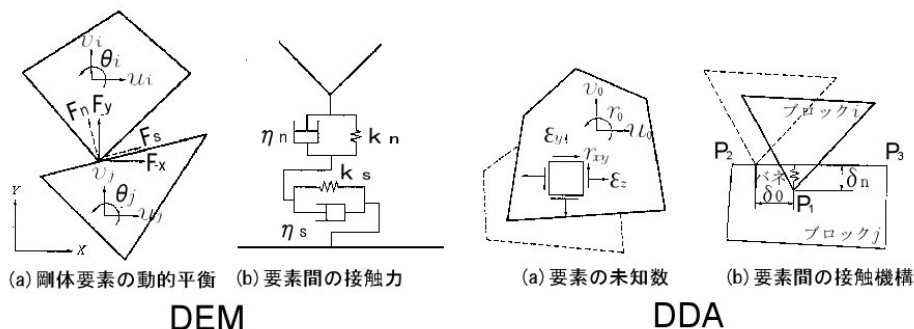


図 3.1.4 DEM,DDA のモデルと接触機構

図中の記号(k_n , k_s)は、垂直剛性、せん断剛性と呼ばれる。また、不連続面の強度特性にはモール・クーロン則が適用されるが、不連続面の粗さを考慮した **Barton** 等のせん断強度式が適用される場合もある。なお、用いる解法や接触機構や運動表現の違いによって、**RBSM** は微小変形問題、**DEM** と **DDA** は動的大変形問題を扱うのに有効な手法として区分されている。

近年、その適用事例も増えており、前述の越前玉川海岸のトップリング崩壊では **DEM**(個別要素法)が用いられ、転倒岩体下部の弱層の存在が滑りと転倒とを分ける原因となったことを明らかにしている[2]。また、豊浜トンネル崩落災害では **DDA**(不連続変形法)が用いられ、背後の水圧の影響を評価し、崩落によってトンネルに与えた影響をリアルに再現している[2]。

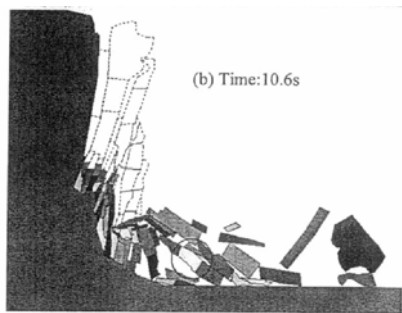


図 3. 1. 5 天鳥橋崩壊事例への DDA
解析の適用事例

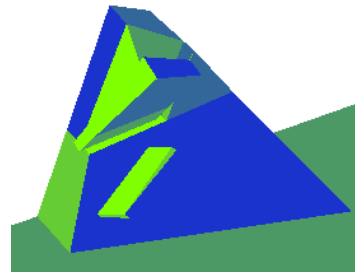


図 3. 1. 6 天鳥橋崩壊事例への DDA
解析の適用事例(三次元)

また、豊浜トンネル以後に全国 9 箇所で実施された岩盤崩壊の継続計測において、唯一の崩壊事例となった天鳥橋の崩壊では、詳細なモデルと計測結果をもとに、岩体下部の不連続面強度を 50%低下させることで崩壊現象が再現できることを示している[10]。また、本事例では三次元解析も行われている[11]。

一方、**DEM**、**DDA** は、岩塊や落石の落下現象解析にも適用範囲を広げている。倉岡らは、三次元 **DEM** を用いて、規模の大きい岩塊の落下後の挙動を追跡している[12]。同様にして、西村ら、氏平らは三次元 **DEM** による形状を考慮した落石シミュレーションの開発を行っている[13][14][15][16]。**DDA**(不連続変形法)においても、佐々木ら、萩原らの粘性係数と速度エネルギー比の設定法に関する研究があり、布川、三木、萩原らの **DDAball**(球要素剛体解析)を用いた落石シミュレーションに関する研究があるが、これについては後述する。

3.1.3 質点解析法

岩盤崩壊とはやや異なるが、主に落石を対象とした影響解析手法に質点解析がある。経験法に頼ることの多かった落石問題であるが、落下経路の地形が複雑で、岩塊が大きく形状が複雑な場合など、経験的手法による予測の適用範囲を超える災害が増加したことから、落石シミュレーションが注目されるようになった。落石シミュレーションには、落石運動を質点として扱う質点解析法と、形状のあるブロックとして扱う方法の2種類がある。後者は、不連続体解析法とも呼ばれるが、落石分野では質点解析法と区別するために非質点解析法と呼ばれている。

質点系シミュレーションは、落石を円筒や球体と仮定して解析的に解く方法で、1970年代から1980年代に開発が進んだ。我が国では吉田(1983)や右城(1983)らが相次いで質点解析による手法を発表している。また、Piteau(1976)、Bozzolo(1986)、Pfeiffer(1990)、Stevens(1993)らの研究がある。

表 3.1.3 質点解析法の種類と特徴[17]

質点解析法の種類	解析法の特徴
1)吉田らの方法	反発係数、減衰係数を使用。遷移条件として限界速度を設定)
2)古賀らの方法	反発係数を使用。ころがり摩擦係数を導入。
3)右城らの方法	反発係数を使用。極限地盤反力度により速度依存を表現)
4)榊谷、小村らの方法	反発係数に速度依存性を考慮。他にころがり摩擦係数、地盤反力度を考慮。
5)RocFall(トロント大学)	反発係数、減衰係数を使用。
6)CRSP(コロラド大学)	反発係数、減衰係数を使用。スケールファクターにより速度依存性を考慮。
7)ROTOMAP(Geo&Soft)	反発係数、減衰係数を使用。準三次元シミュレーション。

当初は大きさを持たない質点としてモデル化され、回転はほとんど考慮されていなかったが、現在ではほとんどの質点解析法が、落石を大きさのある剛体平面としてモデル化することで回転運動を考慮している。現在では準三次元、あるいは三次元で解析する手法も提案されている[17]。

3.1.4 岩盤崩壊メカニズム解析のための解析法

岩盤崩壊や落下後の岩塊による災害防止を目的として、さまざまな解析手法が提案されている。それぞれ開発の背景と目的があり、いずれの方法も崩壊初期の微少な変形から崩落後の岩塊追跡まで、それぞれが得意とする局面で適用できる。しかし、岩盤の特徴である不連続面を考慮可能で、かつ崩落後の岩塊の挙動を形状を考慮して追跡可能な手法となると、現段階では不連続体解析法のみである。本研究では、不連続変形法(DDA)を岩盤崩壊、落石解析問題に適用、あるいは実用化する際の問題点について検討した。

3.2 不連続変形法の基本原理

不連続変形法は, shi(1984)らにより, 岩盤構造物を主な解析対象として開発された[18].

DDA は, これまでに二次元を拡張した三次元 DDA(3d-DDA), 円形, 楕円形要素を導入した DDA-Ellips, 剛体として球要素を採用して三次元化した DDAball など, さまざまなバリエーションが開発されている. その扱いの容易さから, 岩盤関係を中心に適用範囲も広がっている. 用途に応じて, 扱う形状が多角形, 球体, あるいは弾性体と剛体といったさまざまな方法が開発されているが, いずれもハミルトン原理にもとづく運動方程式を小さい時間刻みで解く手法であることには変わらない[19]. 最も基礎的な 2d-DDA の基本的なフローチャートを図 3.2.1 に示す.

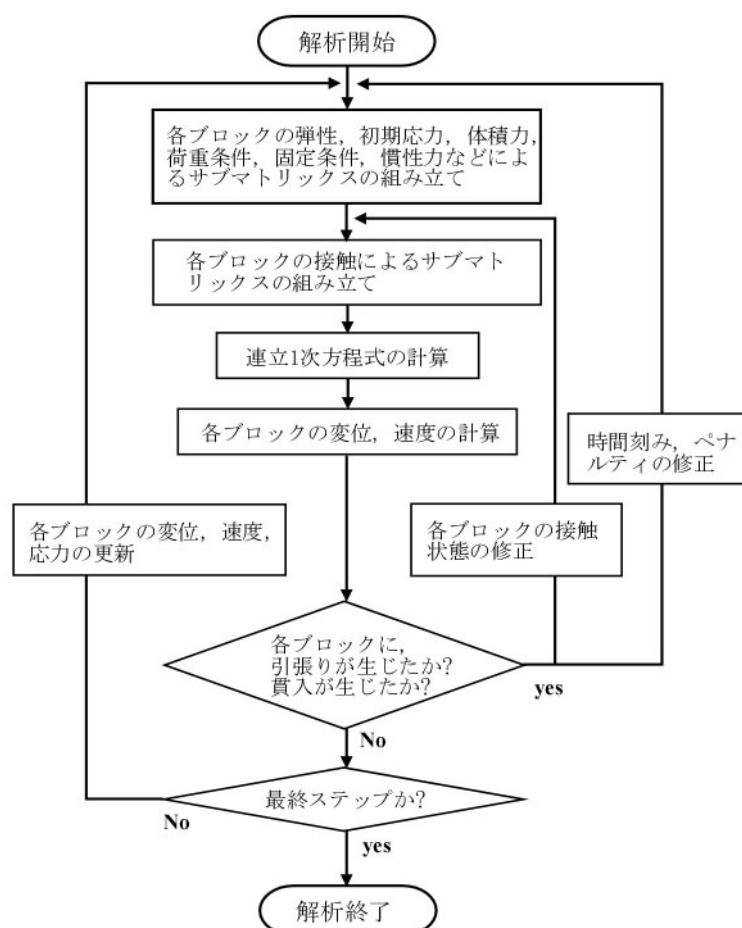


図 3.2.1 不連続変形法のフロー[19]

3.2.1 DDA の原理

DDA は、式(1)に示すハミルトンの原理に基づき、接触を含む運動方程式を、エネルギー最小化原理により釣り合い方程式を求めて定式化している。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (3.2.1)$$

ここに、 M は質量マトリックス、 C は減衰マトリックス、 K は合成マトリックス、 F は外力ベクトルである。また、 t は時間、 u はブロック重心における変位、 \dot{u} は変位速度、 \ddot{u} は変位加速度である。式(3.3.1)の減衰マトリックス C は、粘性係数 η と質量マトリックス M を用いて、以下のように表される。

$$C = \eta M \quad (3.2.2)$$

式(3.2.1)は、Newmark の β 、 γ 法を用いて、増分変位に対する以下の釣り合い方程式に変換される。

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \quad (3.2.3)$$

$$\tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{\eta}{\Delta t} M + K_e + K_f \quad (3.2.4)$$

$$\tilde{F} = \frac{2}{\Delta t} M\dot{u} + (\Delta F - f) \quad (3.2.5)$$

ここに、 Δt は時間刻み、 Δu は変位増分、 K は剛性マトリックス、 ΔF は荷重ベクトルである。式(3.2.4)、式(3.2.5)は、エネルギー最小化原理を用いることで組み立てられる。

3.2.2 ブロックの変位と変形

DDA では、図 3.2.2 に示すように要素ブロック内において定応力・定ひずみを仮定し、ブロックの重心点の剛体変位(u_0, v_0)、重心(x_0, y_0)まわりの回転角 r_0 、垂直ひずみとせん断ひずみ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$)の 6 つを変位変数としてブロックの挙動を解析する。

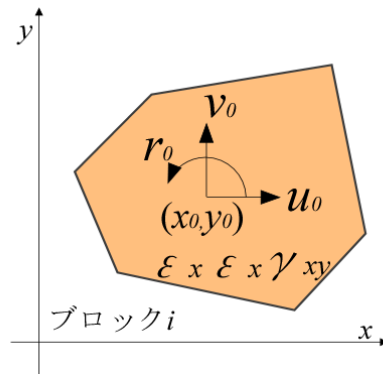


図 3.2.2 DDA の座標系と未知数

要素ブロックの各変位は、重心座標を用いて以下のように表される。

<並進>

ブロックの移動が並進成分(u_0 v_0)だけの場合、ブロック上の任意の点(x,y)の変位(u,v)は、以下で表わされる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} \quad (3.2.6)$$

<回転>

ブロックが、重心点(x_0,y_0)の回りに回転角 r_0 だけ回転すると、ブロック内の任意の点(x,y)における変位(u,v)は、ブロックの重心を(x_0,y_0)として、以下で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(y-y_0) \\ (x-x_0) \end{pmatrix} r_0 \quad (3.2.7)$$

<垂直ひずみ>

ブロック内で垂直ひずみが一定とすると、ブロック内の点(x,y)における変位(u,v)は、ブロックの重心を(x_0,y_0)として、以下で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x-x_0 & 0 \\ 0 & y-y_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{pmatrix} \quad (3.2.8)$$

<せん断ひずみ>

ブロック内でせん断ひずみが一定とすると、ブロック内の点(x,y)における変位(u,v)は、ブロックの重心を(x_0,y_0)として、以下で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{y-y_0}{2} \\ \frac{x-x_0}{2} \end{pmatrix} \gamma_{xy} \quad (3.2.9)$$

<ブロック変形マトリックス>

点(x,y)の全変位(u,v)は、以上の並進、回転、垂直ひずみ、せん断ひずみの 6 組の変位成分を足し合わせたものとなる。式 3.2.6～3.2.9 を足し合わせると、ブロック変形マトリックスは、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & x-x_0 & 0 & \frac{y-y_0}{2} \\ 0 & 1 & x-x_0 & 0 & y-y_0 & \frac{x-x_0}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.2.10)$$

となる。

式(3.2.10)は、次の形式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [T_i][D_i] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & x-x_0 & 0 & \frac{y-y_0}{2} \\ 0 & 1 & x-x_0 & 0 & y-y_0 & \frac{x-x_0}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.2.11)$$

ここに、 $[D_i]$ は6個の変位変数であり未知数である。

$$[D_i] = (u_0 \ v_0 \ r_0 \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy})^T \quad (3.2.12)$$

$[T_i]$ はブロックの一次変位関数である。式 3.2.11 は、変形と要素形状の関係を表しており、この式を用いて各時間ステップでの要素形状と変位が更新される。

3.2.3 エネルギー最小化原理と全体剛性方程式

DDA では、外力や応力などによる各ブロックのポテンシャルエネルギー Π_i を最小化することで平衡方程式を導く。n 個のブロックからなる、全体剛性方程式は、以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad or \quad [K]\{D\} = [F] \quad (3.2.13)$$

ここで、係数マトリックス $[K_{ij}]$ は、 6×6 のサブマトリックスである。 $[K_{ii}]$ は、ブロック i の材料物性や荷重条件を表すサブマトリックス、 $[K_{ij}] (i \neq j)$ はブロック i と j の接触を表すサブマトリックスである。

また、 $[F_i]$ は、6 個の変位変数に対応するブロック i の外力ベクトルである。

これらの釣り合い方程式は、外力や応力による全ポテンシャルエネルギー Π_i を最小化することで得られる。

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial d_{ri}} = 0 \quad (r=1,2,\dots,6) \quad (3.2.14)$$

ここで d_{ri} は、i 番目のブロックの未知数 $[D_i]$ の各コンポーネント ($r=1,2,\dots,6$) を表す。各成分ごとのブロック i に作用する、x 方向、y 方向の荷重、接触力による釣り合い式は式

(3.2.15), 荷重と接触力から生じるモーメントは式(3.2.16), また応力と外力による変位の釣り合いは式(3.2.17)で表される.

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial u_0} = 0, \quad \frac{\partial \Pi_i}{\partial v_0} = 0 \quad (3.2.15)$$

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial r_0} = 0 \quad (3.2.16)$$

$$\frac{\partial \Pi_i}{\partial \varepsilon_x} = 0, \quad \frac{\partial \Pi_i}{\partial \varepsilon_y} = 0, \quad \frac{\partial \Pi_i}{\partial \gamma_{xy}} = 0 \quad (3.2.17)$$

全体ポテンシャルエネルギーは, 個々のブロックにおけるポテンシャルエネルギーを求めて最小化することで, 全体の釣り合い状態を表すことができる. すなわち, 式(3.2.13)を式(3.2.11)に代入することでブロックの変位(u,v)を求めることができる.

なお, 変位変数に関する 2 階の微分

$$\begin{aligned} [K_{ij}] &= k_{r,s} \\ &= \frac{\partial^2 \Pi}{\partial d_{ri} \partial d_{sj}} \quad (r, s = 1, 2, \dots, 6) \end{aligned} \quad (3.2.17)$$

は, 6×6 のサブマトリックスであり, 変数 d_{ri} に対応する釣り合い式 の未知数 d_{sj} の係数を表す. したがって, 式 は, サブマトリックス $[K_{ij}]$ の r 行 s 列成分を表す. これを全体剛性方程式の係数マトリックスに重ね合わせる.

また, 変位変数の 1 階の微分

$$\begin{aligned} [F_i] &= f_r \\ &= -\frac{\partial \Pi(0)}{\partial d_{ri}} \quad (r = 1, 2, \dots, 6) \end{aligned} \quad (3.2.18)$$

は, 全体剛性方程式の外力ベクトルに重ね合わせられる.

3.2.4 全体剛性方程式中の各サブマトリックス

全体剛性方程式中のサブマトリックスには, 弾性, 物体力, 慣性力, 粘性力の他, 荷重, 変位拘束などがある. ここでは, 弾性, 物体力, 慣性, 粘性力のサブマトリックスの組み立てについて述べる.

なお, 各サブマトリックスは, 各ポテンシャルエネルギーを最小化した後, 次の式に重ね合わせられる. 重ね合わせは, 剛性項と外力項に分けて行われるが, 重ね合わせ先を以

下のように表わす.

$$\Pi = [K_i] \quad \text{or} \quad [F_i]$$

①弾性サブマトリックス($S[E_i]$)

ブロック i に作用する応力による弾性ひずみエネルギー Π_e は次式で表される.

$$\Pi_e = \iint \frac{1}{2} (\varepsilon_x \sigma_x + \varepsilon_y \sigma_y + \gamma_{xy} \tau_{xy}) dx dy \quad (3.2.19)$$

平面応力条件における弾性マトリックス $[E_i]$ は, 以下の 6×6 のマトリックスに拡張して表される.

$$[E_i] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \quad (3.2.20)$$

弾性ひずみエネルギー Π_e は, ブロックの面積を S とすると次式で表される.

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \iint [D_i]^T [E_i] [D_i] dx dy = \frac{S}{2} [D_i]^T [E_i] [D_i] \quad (3.2.21)$$

ブロック i の弾性マトリックス $[E_i]$ は式 3.2.21 を微分, すなわちポテンシャルエネルギーを最小化することで得られる.

$$S[E_i] \rightarrow [K_{ii}] \quad (3.2.22)$$

得られた弾性サブマトリックスは, 全体剛性マトリックス $[K]$ の対角項に重ね合わせられる.

②体積力(物体力)サブマトリックス

ブロック i に一様な物体力 (f_x, f_y) が作用しているとき, ポテンシャルエネルギー Π_w は次式で表される.

$$\Pi_w = -\iint (f_x u + f_y v) dx dy = -\iint (u \ v) \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} dx dy \quad (3.2.23)$$

ここで、 (u,v) は、ブロック i 上の任意の点 (x,y) における変位であり、変形マトリックス $[T]$ を用いて以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = [T_i] [D_i] \quad (3.2.24)$$

したがって、ポテンシャルエネルギー Π_w は、以下のように表される。

$$\Pi_w = -\iint [T_i]^T [D_i]^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} dx dy \quad (3.2.25)$$

ここで、

$$\iint [T_i]^T dx dy = \begin{pmatrix} S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (3.2.26)$$

であるので、 Π_w を最小化するために微分すると、以下の体積力ベクトルが得られる。

$$[F_i] = -\frac{\partial \Pi_w}{\partial d_{ri}} = \frac{\partial}{\partial d_{ri}} [D_i]^T \begin{pmatrix} f_x S \\ f_y S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x S \\ f_y S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow [F_i] \quad (r=1,2,\dots,6) \quad (3.2.27)$$

これを、全体剛性方程式の $[Fi]$ に重ね合わせる。

③慣性力サブマトリックス

ブロック i 上の任意の点の時刻 t の変位を (u,v) 、単位面積あたりの質量を M とすると、単位面積あたりの慣性力 (f_x, f_y) は、式(3.2.28)のように表される。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = -M \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{pmatrix} = -M \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{pmatrix} u(t) \\ v(t) \end{pmatrix} = -M [T_i] \frac{\partial^2 [D_i(t)]}{\partial t^2} \quad (3.2.28)$$

慣性力によるポテンシャルエネルギー Π_i は、式(3.3.29)のようになる。

$$\Pi_i = -\iint (u \ v) \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} dx dy = \iint M [D_i]^T [T_i]^T [T_i] \frac{\partial^2 [D_i]}{\partial t^2} dx dy \quad (3.2.29)$$

ここで，時間間隔を Δt として，時間ステップ計算前の時刻 t の変位を $[D_i^0]$ ，時間ステップ計算後の時刻 $t + \Delta t$ の変位を $[D_i^1]$ として，時間積分をすると

$$[D_i^1] = \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 [D_i^0]}{\partial t^2} + \Delta t \frac{\partial [D_i^0]}{\partial t} \quad (3.2.30)$$

したがって，式 3.2.29 の加速度項は次のようになる．

$$\frac{\partial^2 [D_i^0]}{\partial t^2} = \frac{2}{\Delta t^2} [D_i^1] - \frac{2}{\Delta t} \frac{\partial [D_i^0]}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t^2} [D_i^1] - \frac{2}{\Delta t} [V_i^0] \quad (3.2.31)$$

ここで， $[V_i^0] = \frac{\partial [D_i^0]}{\partial t}$ であり，時間ステップ計算開始時の初速である．

これより式(3.2.29)は，式(3.2.31)を用いて，次のように書き表せる．

$$\Pi_i = \iint [D_i^1]^T [T_i]^T [T_i] \left(\frac{2M}{\Delta t^2} [D_i^1] - \frac{2M}{\Delta t} [V_i^0] \right) dx dy \quad (3.2.32)$$

式(3.2.32)のポテンシャルエネルギーを最小化して，剛性項と外力項に足し合わせる

$$\begin{aligned} \frac{2M}{\Delta t^2} \iint [T_i]^T [T_i] dx dy &\rightarrow [K_{ii}] \text{ (対角項)} \\ \frac{2M}{\Delta t} \left(\iint [T_i]^T [T_i] dx dy \right) [V_0] &\rightarrow [F_i] \end{aligned}$$

なお，時間ステップ計算後の時刻 $t + \Delta t$ の変位速度 $[V_i^1]$ は，式(3.2.31)から

$$[V_i^1] = \frac{2}{\Delta t} [D_i^1] - [V_i^0] \quad (3.2.33)$$

となり，動的解析を行う際の次の時間ステップの開始速度となる．ただし，準静的解析の場合には $[V_i^0]$ は 0 である．

④粘性力サブマトリックス

時間ステップ Δt における変位の増分 (u, v) が与えられているとき，単位面積あたりの粘性力 (f_x, f_y) は以下のように表される．

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \frac{\mu_d}{\Delta t} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (3.2.34)$$

この力は、ブロックの変位速度に比例する抵抗力である。ポテンシャルエネルギー Π_μ は、式(3.2.35)のように表される。

$$\Pi_\mu = \frac{\mu_d}{\Delta t} \iint [D_i]^T [T_i]^T [T_i] [D_i] dx dy \quad (3.2.35)$$

式(3.2.35)を最小化して、粘性抵抗に関するサブマトリックスを得る。

$$\frac{\mu_d}{\Delta t} \iint [T_i]^T [T_i] dx dy \rightarrow [K_{ii}] \quad (3.2.36)$$

以上が、個々の主なブロックに対する定式化の手続きである。この他にも、初期応力、変位拘束の他、ボルト結合などが、既に定式化されている。

3.2.5 ブロック間の接触

3.2.5.1 接触のタイプ

各ブロックの変位計算が終わると、次にブロック同士の接触判定が行われる。ブロック相互の接触における DDA の基本原則は、以下の 2 点である。

- ① ブロック同士の相互貫入はない(微少な許容値以下)。
- ② ブロック間には引張りが働かない。

この原則のもとで、ブロック同士の接触が判定され、接触していると判定されるとペナルティバネが挿入され、接触していないと判定されるとバネは削除される。この判定の過程は、時間刻みの都度に **Open-Close** と呼ばれる過程を通して行われる。このプロセスは、岩塊や落石の衝突過程を解析するうえできわめて重要である。

ブロック同士の接触タイプは、2 次元ブロックでは図 3.2.3 に示す角-角、角-辺、辺-辺の 3 タイプが考えられている。

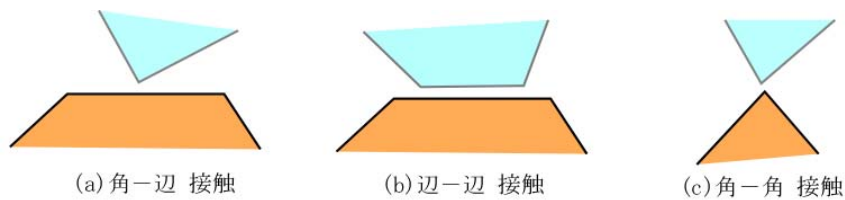
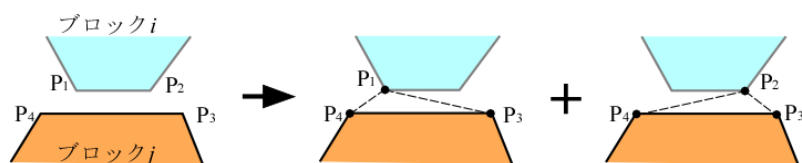
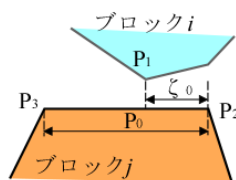


図 3.2.3 DDA の接触タイプ

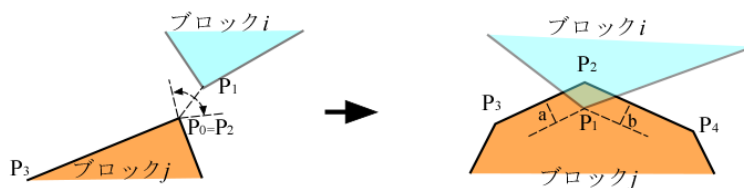
このうち、図 3.2.4 に示したように、(a)辺－辺接触については 2 組の角－辺接触に分解できる。また、(c)角－角接触も、右図に示したように貫入が生じた場合に、 P_1 と辺 P_2P_3 との距離 a 、 P_1 と辺 P_2P_4 との距離 b とを比較して小さい方の距離をとることで角－辺接触として処理できる。したがって、DDA の接触タイプとしては、角－辺接触のみ考えればよいことになる。



(a) 辺－辺接触の処理方法



(b) 角－辺接触の処理方法



(c) 角－角接触の処理方法

図 3.2.4 DDA の接触タイプとその処理

3.2.5.2 法線方向と接線方向の接触力

図 3.2.5 (a) (b) に示すように、DDA では貫入を避けるためにペナルティバネが用いられている。ブロック同士が貫入すると剛性 kn のバネが法線方向に導入され、ブロックが分離するとバネは取り除かれる。同様にして接線方向には、モール・クーロン則が適用される。すなわち、あらかじめ設定された摩擦抵抗よりせん断力が小さい場合、せん断変位を拘束するためのバネ ks が導入され、せん断力の方が大きい場合には摩擦力に相当する外力を作用させる。DDA のブロック同士の接触判定には、図 3.2.5 の左に示す貫入量 d が用いられる。後述するように、 d は貫入を負とし離れているとき正である。

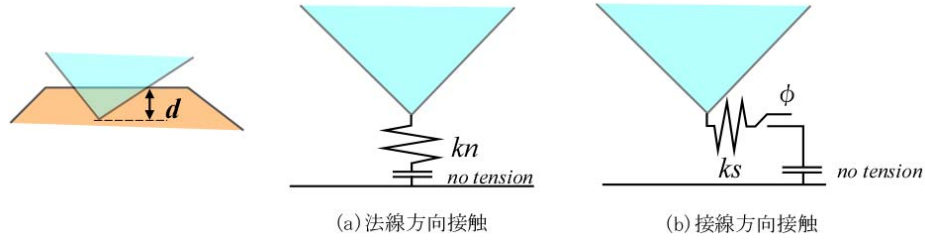


図 3.2.5 DDA の接触力[20]

したがって、 $d > 0$ ならば接触状態ではないため、バネは導入されない、あるいは削除されて、再び全体剛性方程式を解くことになる。一方、 $d < 0$ なら、接触状態であるため、以下の法線方向と接線方向の接触力の計算を行って、接触サブマトリックスを作成し、全体剛性方程式に足し合わせることになる。この過程は、このあとの **Open-Close** 計算で説明する。

(1)法線方向の接触力

図 3.2.6 に示すように、ブロック i の頂点 P_1 が、ブロック j の辺 P_2P_3 と接触可能関係にあるとする。頂点 P_1 が辺 P_2P_3 を横切ったとき、図 3.2.6(b)に示すように接触が生じることになる。

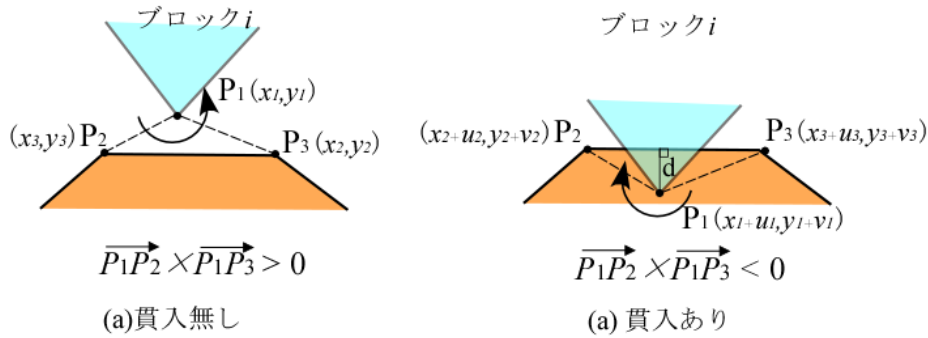


図 3.2.6 辺-角接触の接触機構[20]

ここで、一定方向に付番された三角形 $P_1P_2P_3$ を考える。三角形の面積の 2 倍である S_0 は、

$$S_0 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (3.2.37)$$

で表されるが、頂点 P_1 が辺 P_2P_3 に貫入すると、 $P_1P_2P_3$ の回転方向が変わり、 S_0 の値における正負が反転する。この接触判定結果をもとに、ペナルティバネ導入の有無が決定

される.

貫入量 d_0 は, 引っ張り側の値を負として以下のように定義される.

$$d_0 = \frac{S_0}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}} \quad (3.2.38)$$

図 3.2.6(b)において, 辺 P2P3 の長さを l とすると, 変位後のバネの変形量 d は,

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{l} \begin{vmatrix} 1 & x_1 + u_1 & y_1 + v_1 \\ 1 & x_2 + u_2 & y_2 + v_2 \\ 1 & x_3 + u_3 & y_3 + v_3 \end{vmatrix} \\ &\approx \frac{1}{l} + \frac{1}{l} \left\{ (y_2 - y_3 \quad x_3 - x_3) \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} + (y_3 - y_1 \quad x_1 - x_3) \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} + (y_1 - y_2 \quad x_2 - x_1) \begin{pmatrix} u_3 \\ v_3 \end{pmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (3.2.39)$$

となる.

ここで,

$$[E_i] = \frac{1}{\ell} (y_2 - y_3 \quad x_3 - x_2) [T_i(x_1, y_1)] \quad (3.2.40)$$

$$[G_j] = \frac{1}{\ell} (y_3 - y_1 \quad x_1 - x_3) [T_j(x_2, y_2)] + \frac{1}{\ell} (y_1 - y_2 \quad x_2 - x_1) [T_j(x_3, y_3)] \quad (3.2.41)$$

とおくと, ペナルティバネの剛性を p_n としてバネに蓄えられるエネルギー Π_k は, 式 (3.2.42) で表される. $[E_i]$, $[G_i]$ は, 接触ブロック座標に関する関数である.

$$\begin{aligned} \Pi_k &= \frac{p_n}{2} d^2 \\ &= \frac{p_n}{2} \left([E_i][D_i] + [G_i][D_i] + \frac{S_0}{\ell} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.2.42)$$

式(3.2.42)は, 貫入量 d をある許容値以下にするという条件のもとで最小化され, 接触部の法線方向バネによるペナルティマトリックス $[K_p]$ を得る.

$$[K_{\lambda p}] = \frac{\partial^2 \Pi_k}{\partial d_{ri} \partial d_{si}} \quad (3.2.43)$$

剛性マトリックスへの重ね合わせ項は,

$$\begin{aligned}
p_n [E_i]^T [E_i] &\rightarrow [K_{ii}] \\
p_n [E_i]^T [G_j] &\rightarrow [K_{ij}] \\
p_n [G_j]^T [E_i] &\rightarrow [K_{ji}] \\
p_n [G_j]^T [G_j] &\rightarrow [K_{jj}]
\end{aligned} \tag{3.2.44}$$

の 6×6 のサブマトリックスである．外力項への重ね合わせは、

$$\begin{aligned}
-\frac{p_n S_0}{\ell} [E_i]^T &\rightarrow [F_i] \\
-\frac{p_n S_0}{\ell} [G_j]^T &\rightarrow [F_j]
\end{aligned} \tag{3.2.45}$$

の 6×1 のサブマトリックスである．

なお、全体剛性方程式を解き、各ブロックの変位を計算した後、ペナルティバネに作用する接触力 Rn は、以下の式で求められる．

$$\begin{aligned}
Rn &= p_n \cdot d \\
&= p_n \left([E_i][D_i] + [G_j][D_j] + \frac{S_0}{\ell} \right)
\end{aligned} \tag{3.2.46}$$

(2)接線方向の接触力

ブロックが貫入した場合、すなわち $d < 0$ ならば、接触部に法線方向バネが導入され、式(3.2.43)で示したペナルティバネが法線方向に導入される．法線方向の圧縮力、すなわち接触力 Rn が、境界に沿って滑動する場合には、摩擦に相当する力を滑動方向と逆方向に作用させる必要がある．この過程は式(3.2.47)で示され、全体剛性マトリックスの外力項に導入される．

$$\begin{aligned}
- \text{sign}(\delta_s)(Rn \tan \phi + c) [E_i]^T &\rightarrow [F_i] \\
\text{sign}(\delta_s)(Rn \tan \phi + c) [G_j]^T &\rightarrow [F_j]
\end{aligned} \tag{3.2.47}$$

ここに、 ϕ は摩擦角、 c は粘着力である．また、 sign は図 3.2.6 の辺 P2P3 に対するせん断変位の方向をあらわすパラメータであり、 -1 あるいは 1 である．

ブロックが離れると、バネは取り除かれる．

3.2.6 接触時の繰り返し計算

図 3.2.7 は、図 3.2.1 で示したフローを、落石解析を念頭においてフローで説明した、

DDA 解析の流れである。3.2.3～3.2.4 で述べた過程を経た後、3.2.5 での計算結果を基に Open-Close と呼ばれるブロック相互の接触判定過程に移る。この過程は、ブロックの形状、タイムステップ、ペナルティバネによって変化するだけでなく、ブロック同士のこすれ合うような動き、あるいは高速で衝突するブロックの動きといった解析の対象にも影響し、ここでブロックの接触状態の修正や、時間刻み、ペナルティバネの修正が行われる。その後、接触点と座標の更新が行われ、1 タイムステップが終了する。

DDA では、粘性係数と速度エネルギー比という 2 つの入力値がエネルギー減衰のために用いられる。図 3.2.7 に示すように、粘性係数は運動方程式中で掛けられ、解析時の全ステップを通してすべての運動に作用する。一方、速度エネルギー比は、衝突、すなわち接触が判定された最初の 1 回のときのみ導入される。換言すれば、DDA は弾性解析であるため、粘性係数がゼロならば衝突に対しては弾性反発解析である。速度エネルギー比は、これを非弾性衝突解析にするために導入される。なお、時間刻みの修正は、常にタイムステップを短くする方向に働く。余談だが、落石解析では、この修正モードに入っただけで、ほとんどの場合、異常貫入による停止や貫通が生じる(エネルギー増加、減衰は別問題)。時間刻み、ペナルティバネの設定はきわめて重要である。

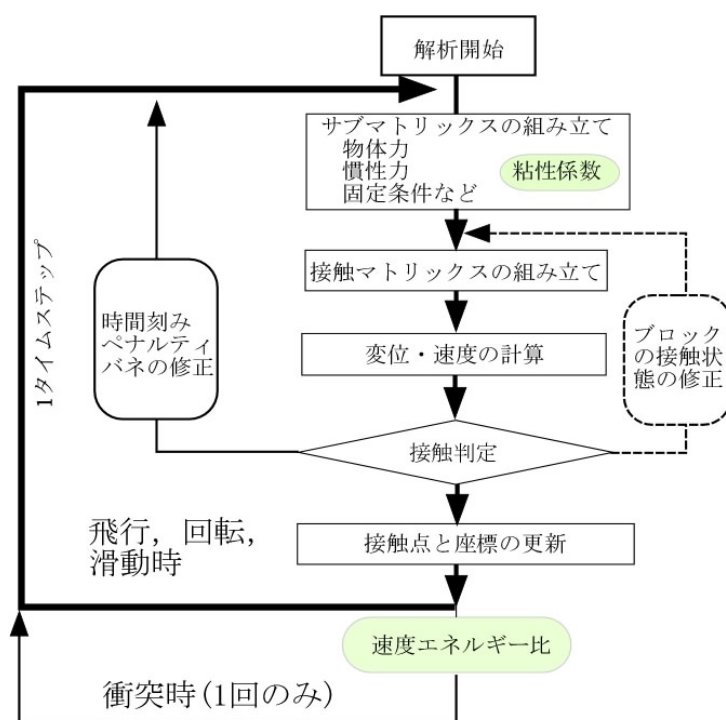


図 3.2.7 不連続変形法(DDA)の落石解析適用時のフロー

3.3 解析に用いる物性値の取得法

岩盤を対象とした解析法のうち、FEM に代表される連続体解析の物性値は、岩盤としての変形・強度特性のみであるが、不連続面を考慮した解析では、岩石と不連続面それぞれについての変形と強度に関する物性値を用意しなければならない。これらの入力物性値のなかには、現場で観察される性状と取り得る値の関係が十分に整理されていないものもある。本節では、これらの入力物性値に関する基本事項をまとめるとともに、現場に即した簡易な試験法を中心に、その取得法を紹介する。

また、崩壊発生後の岩塊による被害影響予測、すなわち落石シミュレーションに用いられるパラメータについても触れる。

3.3.1 岩盤の変形・強度特性と不連続面の影響

(1) 岩盤分類による方法

岩盤の変形・強度パラメータを最も簡単に概括的に推定する方法が、岩盤分類による方法である。

ダム、トンネル、橋梁など目的別に多くの分類法が提案され、実用化されている。どちらかというと、脆弱な岩盤に力点が置かれていて、本論文で扱うような不連続面にその挙動が支配される硬い軟岩～中硬岩以上の岩盤であっても、その影響を定量的に扱ったものは少ない。一方、不連続面の影響を明確に取り込んだ岩盤分類法として、RMR (Rock Mass Rating) や Q システムが知られている。これらの分類法の利点は、室内試験の供試体サイズ以上の間隔で分布する不連続面の影響を考慮することができる点にある。岩盤斜面の経験的評価法の一つである SMR (Slope Mass Rating) も、RMR を基礎においている。

図 3.3.1 は、Q 値、RMR と変形係数との関係を整理したものであり、この図から変形係数を推定することができる[21]。もっとも、欧米の原位置岩盤の変形係数データをもとにしているため、RMR が 40 以下の岩盤が大勢を占める我が国では適用が難しいという指摘もあるが、これを改良する試みもある[22]。

$$E_m = E_0 \sqrt{e^{(RMR-100)/9}} \quad 3.3.1$$

E_m : 岩盤の変形係数

E_0 : 岩石の静弾性係数

式 3.3.1 は、岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみがほぼ等しいという仮定のもとで提案されたもので、RMR がおよそ 15～40 の岩盤に適用されるとしている。

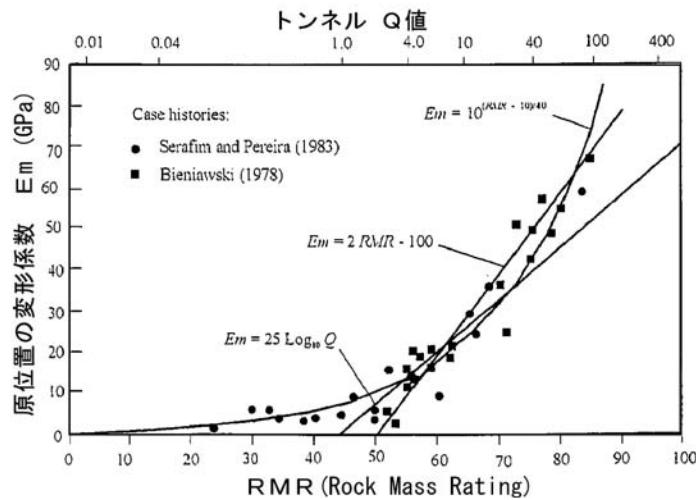


図-3.3.1 RMR と変形係数

(2) 試験による方法

岩盤の物性値は、本来は原位置試験や三軸圧縮試験、あるいは一面せん断試験などによって決定すべきであるが、試料の採取や整形が難しく、土質試験に比べて大がかりな試験装置を要することから、試験を実施するに至らないことが多い。これに代わって行われるのが、ボーリング孔を利用した孔内載荷試験や、コアやブロックサンプルを利用した一軸圧縮試験や圧裂引張試験、チルト試験などの簡易な試験である。

ここでは、岩盤の変形、強度特性を、岩石試験結果から推測する手法としてしばしば用いられる亀裂係数と、数値解析において局所的な破壊の目安とされることの多い限界ひずみについて述べる。

<亀裂係数>

不連続面の存在が、岩盤地山としての強度・変形特性を低下させる主要な要因の一つであることはよく知られている。その低下を定量的に予測する指標として、亀裂係数による方法がある[23]。亀裂係数は、式 3.3.2 で求められる。

$$C_r = 1 - \left(\frac{V_p}{V_o} \right)^2 \quad 3.3.2$$

ここに C_r : 亀裂係数

V_o : 室内試験で求められた供試体の弾性波速度

V_p : 現場で求められた地山弾性波速度

＜岩盤の弾性係数＞

不連続面の影響を考慮した岩盤の弾性係数は、亀裂係数を用いて以下のように求められる。

$$E = C_r \times E_o \quad 3.3.3$$

ここに E : 地山の弾性係数

E_o : 岩石供試体の弾性係数

＜岩盤の強度＞

同様にして、不連続面の影響を考慮した岩盤の強度は、亀裂係数を用いて以下の手順で求められる[23].

式 3.3.4, 3.3.5 は、一軸圧縮強度と圧裂引張り強度から c , ϕ を推定するための簡便式である。

$$C_o = \frac{1}{2} \sqrt{q_u \times T_u} \quad 3.3.4$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \frac{q_u - T_u}{q_u + T_u} \quad 3.3.5$$

q_u : 一軸圧縮強度

T_u : 引張り強度

不連続面の影響を考慮した強度は、亀裂係数と図 3.3.2 を用いて、式(3.3.6), (3.3.7)から求められる。

$$C = K_c \times C_o \quad 3.3.6$$

$$\phi = K_\phi \times \phi_0 \quad 3.3.7$$

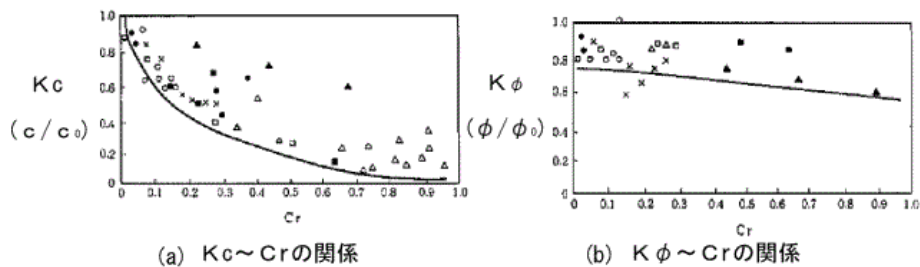


図-3.3.2 亀裂係数を用いて原位置せん断強度を求めるための低減係数

＜限界ひずみ＞

岩盤の破壊基準であるモール・クーロン則は、弾性・塑性の境界を示す基準であるが、これを少しだけ弾性側で判断するための基準として限界ひずみが用いられる(図 3.3.3)。

図 3.3.4 は、岩石試験によって得られる限界ひずみが、地山の限界ひずみとほぼ一定の関係にあることを示した図である[24]。この図から、数値解析によって求められたせん断ひずみが、一軸圧縮試験で求められた限界ひずみより大きければ、その部分の岩盤は破壊しているとみなせることになる。ただし、この基準は斜面全体の破壊を示すものではない。

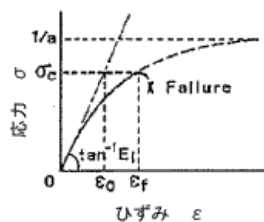


図 3.3.3 一軸圧縮状態での
限界ひずみ

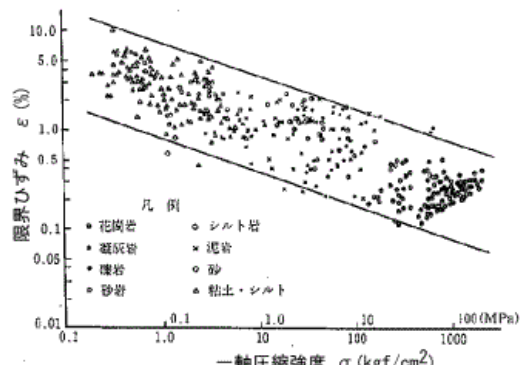


図 3.3.4 室内試験による限界ひずみと一軸圧縮
強度の関係[]

3.3.2 不連続面の変形・強度特性

不連続面の変形・強度特性は、基本的に粗さと壁面強度と充填部の有無で決まる。ただし、充填物の影響が大きいので、その有無によって、試験や評価の方法が異なる。ここでは、最初に不連続面自体の変形・強度特性について述べ、ついで充填物がある場合の強度特性について述べる。

＜変形特性＞

不連続面の挙動は、開口、閉合、滑動で表される。ここで述べる不連続面の変形特性は、主に圧縮変形すなわち閉合と、滑動にともなうものである。閉合は、不連続面に垂直な方向の圧縮変形特性(垂直剛性)で、滑動(せん断)は不連続面に平行なせん断変形特性(せん断剛性)で表される。

垂直剛性(k_n)は、不連続面を挟む供試体の一軸圧縮試験時の垂直応力と垂直変位の関係を示す曲線の勾配から求められる(図 3.3.5(a))。ただし、この方法で計測される垂直変位には不連続面と岩石供試体自体の変位が含まれるため、別途岩石自体の変位を差し引かなければならない。せん断剛性(k_s)は、一面せん断試験時のせん断応力とせん断変位の関係を示す曲線の勾配から求められる(図 3.3.5(b))。

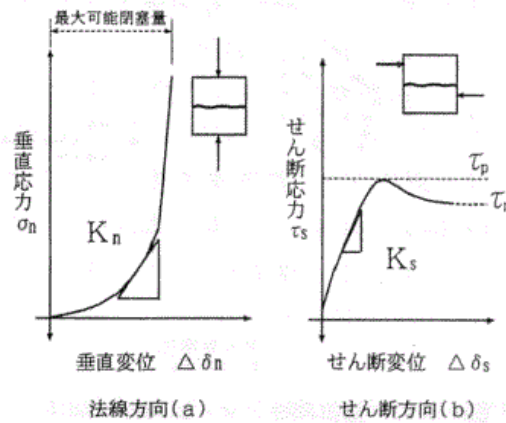


図 3.3.5 不連続面の变形特性[25]

ただし、これらの試験は、試料の採取や整形が難しく、経済性などの問題もあって、実施例としては少ない。これに代わって、無亀裂な岩石(インタクトロック)の弾性係数と地山の変形係数から間接的に推定する方法が DEM では紹介されている。

単一の不連続面を含む供試体を、面に垂直な方向に一軸圧縮試験を行った場合、その弾性係数とインタクトな岩石の弾性係数との間には、以下のような関係がある。

$$\frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{k_n \cdot s} \quad 3.3.8$$

したがって、岩盤と岩石の弾性係数と垂直剛性、せん断剛性と不連続面間隔との関係は、以下のように示される。

$$k_n = \frac{E_m \cdot E_r}{s(E_r - E_m)} \quad 3.3.9$$

$$k_s = \frac{G_m \cdot G_r}{s(G_r - G_m)} \quad 3.3.10$$

- E_r : 岩石の弾性係数
- G_m : 岩盤のせん断弾性係数
- G_r : 岩石のせん断弾性係数
- k_n : 垂直剛性
- k_s : せん断剛性
- s : 不連続面の間隔

一方、DDA でも、同様の記号で kn, ks が用いられるが、こちらは DEM とは少し異なる。すなわち、DDA では接触問題の解法にペナルティ法を用いており、接触による貫入が検出されるとブロックはペナルティ法の原理にしたがってブロックを押し戻すべく、貫入量に応じた所定のバネを導入してブロックを押し戻す。 Kn は、このブロックを押し戻す力として導入されている。このため、弾性係数などとの直接的関係は低く、むしろタイムステップなどに関係するパラメータと考える方がよい。

＜強度特性＞

トンネルや地下空洞など高い拘束圧のもとでのせん断強度は岩石どうしの摩擦の影響が大きいが、岩盤崩壊のような低い拘束圧下でのせん断強度は、不連続面の粗さの影響を大きく受ける。

図 3.3.6 は、このような破壊の過程を模式化したものであり、ここでは垂直応力 σ_n とせん断強度 τ との非線形な関係を、以下の 2 つの線形関数で近似している[26]。

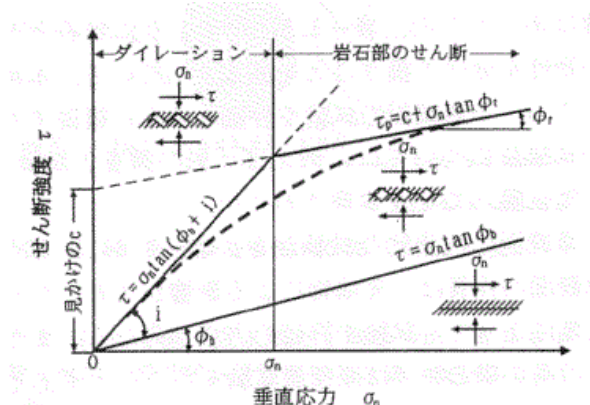


図 3.3.6 不連続面のせん断モデル[26]

$$\tau = \sigma_n \tan \phi_{b+i} \cdots \sigma_n \text{が低い場合} \quad 3.3.11$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi_b \cdots \sigma_n \text{が高い場合} \quad 3.3.12$$

c : 粘着力

ϕ_b : 不連続面の基本摩擦角(滑らかな不連続面)

i : 粗さの角度

岩盤崩壊を対象とした解析では、式 3.3.11 を適用するのが妥当といえるが、現実には粗さの考慮が難しく、また適切な i を計測することも難しいので、みかけの粘着力を考慮した式 3.3.12 が用いられることも多い。

一方、式 3.3.11 で用いられる $\phi_{(b+i)}$ は、図 3.3.7(a) のチルト試験で求めるが、これも通常は試料の採取と整形が難しい。このため、図 3.3.7(b) に示すようなボーリングコアを用いた簡易なチルト試験によって ϕ_b を求め、設計安全側の値(すなわち残留摩擦角: ϕ_r) として代用する方法もある[25]。

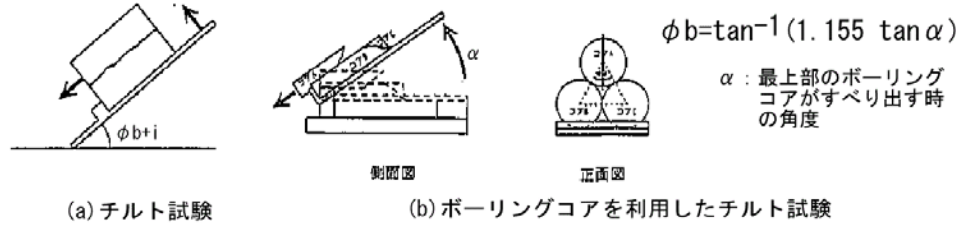


図 3.3.7 不連続面の簡易なせん断試験

一方, Barton は, 人工的な引張り亀裂を不連続面とするせん断試験の結果から, 粗い壁面を持つ不連続面のせん断強度の式として以下を提案している[27][28].

$$\tau = c + \sigma \tan(\phi_r + JRC \times \log(JCS / \sigma_n)) \quad 3.3.13$$

τ : 不連続面のせん断強度

σ_n : 不連続面にかかる垂直応力

ϕ_r : 残留摩擦角 (ϕ_b とする場合もある)

JRC : 粗さ係数

JCS : 壁面強度

※ 本式は, $\sigma_n \leq JCS$, また $\sigma_n \leq JCS/100$ の場合には $\tau = \sigma_n \times \tan 70^\circ$ のもとで有効である.

粗さ係数(JRC : Joint Roughness Coefficient)は, 不連続面の粗さの断面形状を表したもので, 0~20 の値をとる(図 3.3.8). また, 壁面強度(JCS : Joint Wall Compression Strength)は, 壁面の凹凸部分の破壊に関する強度であり, 通常は不連続面に垂直な方向のシュミットハンマー反発度から求められる. 試験が行えない場合は, 岩石の一軸圧縮強度の 1/4 程度が目安とされる. しかし, これを下回ることもある.

ただし, JRC, JCS とともに寸法効果があるため, 以下のような補正を必要とする.

$$JCS_n = JCS_0 (L_n / L_0)^{-0.03 JRC_0} \quad 3.3.14$$

$$JRC_n = JRC_0 (L_n / L_0)^{-0.02 JRC_0} \quad 3.3.15$$

JRC は, 一般に供試体断面の目視観察やレーザー変位計などによって計測されるが, 現場で不連続面を観察することができる場合には, 図 3.3.9 による方が便利である. 本図から, JRC は長さが長くなるほど粗さの効果が小さくなることがわかる. これを寸法効果と呼んでいる.

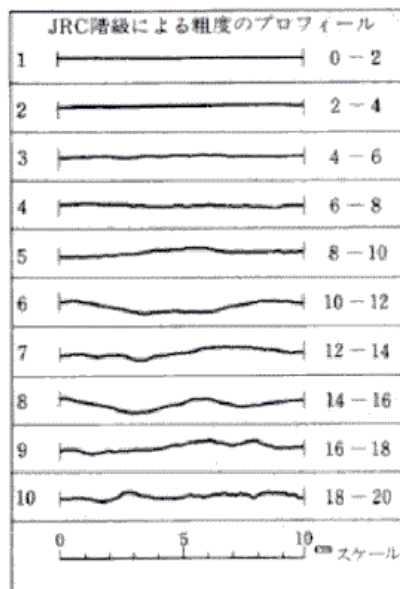


図 3.3.8 粗さ形状と JRC 値の範囲

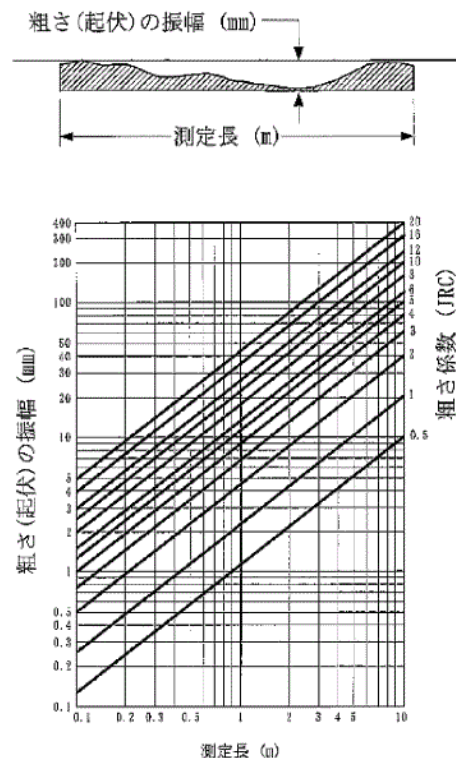


図 3.3.9 粗さの山と山との間の振幅から JRC を求める方法(Bartom1982)

Barton は、残留摩擦角 (ϕ_r) を推定する方法として以下の経験式を提案している[25][28].

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R} \quad 3.3.16$$

r : 風化した飽和状態の不連続面における反発度

R : 乾燥した新鮮な岩盤表面における反発度

ϕ_b : 基本摩擦角

(滑らかな不連続面を対象とする場合には $\phi_b \doteq \phi_r$ として扱う)

一般に、不連続面のせん断強度と垂直応力との間には次のような関係がある。

- (a) 斜面で問題となる低い垂直応力域で非線形性を持つ
- (b) 充填物が粘土質の場合にはその強度が著しく低下する
- (c) ピーク強度と残留強度は不連続面の粗さの影響を強く受け、せん断面積の増加とともに粗さの影響は減少し、ピーク強度は残留強度に近づく(寸法効果)。

＜不連続面に挟在物がある場合のせん断強度＞

岩盤崩壊では風化した岩盤を扱うことが多く、不連続面も風化によって劣化していたり、挟在物を挟むことが多い。不連続面に挟在物を挟む場合、そのせん断強度は挟在物の状態と性質に左右されるうえ、その厚さが数 mm 程度であっても、不連続面の強度や変形性を著しく低下させる。不連続面に充填物を含む場合の摩擦角は、式 3.3.17 から経験的に求められる[25][29]。

$$\phi_r = \tan^{-1}(J_r/J_a) \quad \phi_r = \tan^{-1}(J_r / J_a) \quad 3.3.17$$

ϕ_r : 不連続面の接触状態や挟在物の介在によって異なる摩擦角

J_r : 不連続面の粗さ係数(表 3.2.4)

J_a : 不連続面の変質係数(表 3.2.5)

表-3.3.1 不連続面の粗さ係数

不連続面の粗さ係数	J_r
連続していないジョイント	4.0
粗い、波状のもの	3.0
なめらかな、波状のもの	2.0
粗い、平面的なもの	1.5
なめらかな、平面的なもの	1.0
すべすべした、平面的なもの	0.5
「充填された」不連続面	1.0

※ もし平均ジョイント間隔が3mを超える場合には1.0を加える

表-3.3.2 不連続面の変質係数

不連続面の変質係数	J_a
a) 本質的に充填されていない場合	
癒着した (healed) の場合	0.75
ひずんでいるだけ; 変質していない場合	1.0
シルト質あるいは砂質の被覆	3.0
粘土質被覆	4.0
b) 充填されている場合	
砂あるいは砕岩の充填物	4.0
堅い粘土の充填物 (<5mm厚さ)	6.0
柔らかい粘土の充填物 (<5mm厚さ)	8.0
膨潤した粘土の充填物 (<5mm厚さ)	12.0
堅い粘土の充填物 (>5mm厚さ)	10.0
柔らかい粘土の充填物 (>5mm厚さ)	15.0
膨潤した粘土の充填物 (>5mm厚さ)	20.0

3.3.3 落下岩塊の解析に用いる入力値

岩盤崩壊後の岩塊や落石の挙動を追跡するために、衝突時の速度比や摩擦角など、エネルギー損失を評価する入力値が必要になる。落下後の岩塊の挙動を追跡する解析法には、現在、質点解析法と非質点解析法の2種類が知られている。質点解析は、せいぜい数トンまで、非質点解析法では巨大な岩盤崩壊まで可能とされるが、衝突時のエネルギー損失評価については、両者ともに同じ反発特性が用いられる。

(1) 速度比

速度比には、法線方向速度比(R_n)、接線方向速度比(R_t)、速度エネルギー比(E_r)などが用いられる(図 3.3.10)[17]。なお、速度エネルギー比(E_r)は速度自乗比とも呼ばれる。また、この時の速度比($\sqrt{(V_2/V_1)^2} = R_v$)そのものが、入力値として用いられる場合もある。

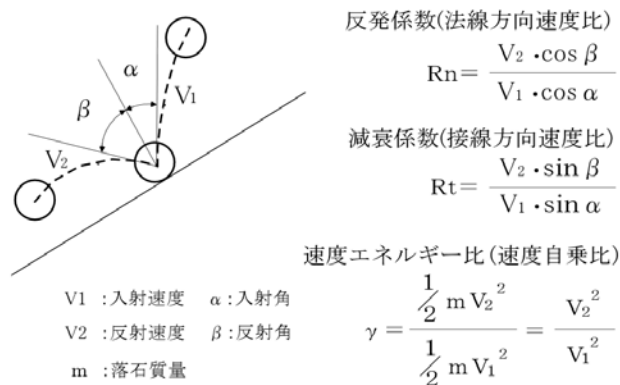


図 3.3.10 主な衝突時の係数

これらの各定数は、主に質点解析の研究を通じて公表された値も多く、なかでももっとも使用頻度の高い法線方向速度比(R_n)と接線方向速度比(R_t)には、表 3.3.3 のように斜面の材質別に細かく設定された値もある[30].

表 3.3.3 斜面材質別の反発係数, 減衰係数

斜面の構成	反発係数 (R_n)	減衰係数 (R_t)
アスファルト	0.40 ± 0.04	0.90 ± 0.04
露岩部	0.35 ± 0.04	0.85 ± 0.04
凹凸の少ない硬岩	0.53 ± 0.04	0.99 ± 0.04
土(植生あり)	0.30 ± 0.04	0.80 ± 0.04
崖錐	0.32 ± 0.04	0.82 ± 0.04
崖錐(植生あり)	0.32 ± 0.04	0.80 ± 0.04

しかし、多くの値が公表されているにもかかわらず、落石シミュレーションが予測解析に積極的に用いられることは少ない。この理由については本章のまとめで述べる。

一方、非質点解析では、これらとは別に速度エネルギー比や粘性係数などが用いられる。これらを落石対策便覧では、質量比例型減衰係数と剛性比例型減衰係数と呼んでいる[17]。質量比例型減衰係数は、衝突の都度働く減衰を表す係数を指し、DDA で用いられる速度エネルギー比や DEM で用いられるバネが該当する。一方、質量比例型減衰係数は、衝突だけでなく衝突や飛行など運動中の落石のすべてにかかる係数で、DDA で用いられる粘性係数がこれに該当する。

(2) 速度エネルギー比

速度エネルギー比は、前述の速度比とは異なる物理量そのものである。DDA では衝突時の運動変化を落体の運動エネルギー損失と捉えるために、線速度エネルギー比と回転運

動エネルギー比の 2 種類が入力値として用いられている。ただし、5 章で述べるように、斜面を落下中の回転運動エネルギーの影響は線運動エネルギーに比べて小さいため、仮の値として線運動エネルギー比と同じ値か、単に 1.0 が入力される。右城らは、我が国の 10 カ所あまりで行われた現場実験をまとめ、我が国の線速度エネルギー比の平均的値を以下のように報告している[31]。

土砂斜面 0.71 ± 0.19

岩盤斜面 0.66 ± 0.23

土砂斜面と岩盤斜面とが逆転しているようにもみられるが、これについては本研究の最後で考察する。

(3) 粘性係数

DDA では、速度エネルギー比とともに粘性係数の使用も可能である。粘性係数には、等価摩擦係数との間に次のような近似的な関係があり、これが入力値設定時の一つの目安となっている[32][33]。

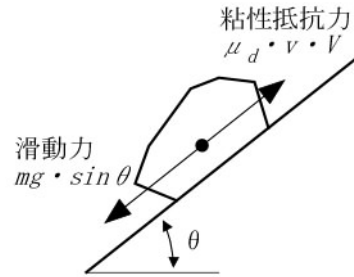


図 3.2.10 すべりによる減衰

落石を滑動として表現した場合の運動方程式は、式 3.3.18 で表される。

$$m \left(\frac{dv}{dt} \right) = mg \cdot \sin \theta - \mu_d \cdot V \quad 3.3.18$$

ここに、 m は質量、 t は時間、 θ は傾斜角度、 V は体積、そして μ_d は粘性係数である。

一方、落石対策便覧では、すべてのエネルギー損失を考慮した係数として等価摩擦係数 μ_r で評価している。

$$\mu_r = (1 - \alpha^2) \tan \theta \quad 3.3.19$$

ここに、 α は速度残存係数、 θ は斜面傾斜角である。したがって、式 3.3.18 は、式 3.3.19 を用いて次のように書き直せる。

$$m \left(\frac{dv}{dt} \right) = mg \cdot \sin \theta - \mu_r \cdot mg \cdot \cos \theta \quad 3.3.20$$

式 3.3.18 と式 3.3.20 から，粘性係数は，次のように書き直せる．

$$\mu_d \cdot V = \mu_r \cdot mg \cdot \cos \theta \quad 3.3.21$$

よって粘性係数(μ_d)は，斜面の高さ，速度および速度残存係数，体積，等価摩擦係数の関数として表される．

$$\mu_d = \frac{mg \cdot \cos \theta}{V \cdot \alpha \sqrt{2gh}} \mu_r \quad 3.3.22$$

SHINJI らは，式 3.3.22 をもとに，図 3.3.12 のような簡易図を作成している．等価摩擦係数と粘性係数は，推測地点の落下速度と平均傾斜角度を媒介にした関係にあることがわかる．

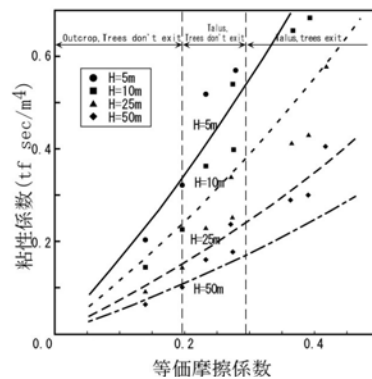


図 3.3.12 粘性係数と等価摩擦係数の関係

3.3.4 物性値のまとめ

一般に，岩盤斜面を対象とした試験では，供試験体の整形に労力と費用を要するため，原位置サンプリングによる試験が行われることは少ない．代わって，ボーリング孔を用いた原位置試験やコアを用いた簡易試験が行われ，それが困難な場合には岩盤分類などの方法を用いて推定が行われる．一方，強度・変形に関する試験と異なり，速度比や速度エネルギー比といった落石解析のための試験法はない．このため，過去の類似条件の現場実験結果が流用されることが多いが，一部の速度比(法線方向速度比(R_n))，接線方向速度比(R_t)など)を除けば適用可能な一般値の整備は進んでいない上，粘性係数のように計測困難な入力値も出現している．加えて，近年，法線方向速度比(R_n)には法線方向入射速度に大きく依存して変化する性質があることが指摘されており，速度エネルギー比(速度自乗比)にも類似の性質の存在が指摘されている．この点を考慮すると従来公表されている値についても早々に見直しが必要となる．

次節では，DDA の岩盤崩落，落石問題への適用という観点から，モデルの問題とともに，速度エネルギー比と粘性係数の適用性の実際について探ることとする．

3.4 不連続変形法の岩盤斜面崩壊への適用例と課題

3.4.1 適用事例にみる移動体のモデル化

DDA は、不連続面によりブロック化した岩塊が、変位しながら安定を失い、崩壊・崩落していく様子を、一連の流れとしてビジュアルに再現可能な解析法である。このため、DDA の解析モデルは移動体の特徴に合わせて、細かな粒～多角形の集合体、あるいは不連続面を考慮したブロックの集合体などで表される。しかし、岩盤斜面の崩壊は、大きな岩塊ブロックで発生する場合もあれば、既往の不連続面に沿った多数の小ブロック群で発生する場合や、さらに小さな土砂状のブロック群で発生するケースもある。

不連続体解析の最終的な目標として、危険岩塊の崩落予測への適用があるが、現段階ではモデルの作成法やブロックの形状や大きさの問題もある。このような岩盤崩壊と解析モデルとの関係を調べるためには、実際の崩壊事例を用いた検討が重要である。これは、崩壊後であれば、調査結果に基づく精緻なモデルの作成が可能だからである。これにより、ブロックの形状や大きさに関する留意点や、入力パラメータに関する設定法などの問題が解決可能といえる。

崩壊後の移動体の体積が大きく、流動化により到達範囲が広くなることが予想される場合、再現性の問題とともに計算に要する時間の問題も生じる。特に、ブロックの大きさ、数が、現実問題への適用の障害となるケースもある。濱崎らは、不連続面情報が得にくい土砂状を呈する移動体のモデル化に際して、ボロノイ分割を用いて到達範囲の違いを摩擦角の変化により評価している[34]。

一方、萩原ら、佐々木らは、中越沖地震で崩壊した妙見岩盤崩壊の事例解析を通じて、調査結果に基づく正確なブロック形状によるモデルを作成することが到達範囲を正確に予測する上で重要と述べている(図 3.4.1)[35][36]。また、大津らは、調査結果に基づく不連続面を配置した崩壊予測モデルにおいて、モデルの影響と入力値である粘性係数の影響を比較し、モデルの方が到達範囲に与える影響は大きいと述べている[33]。

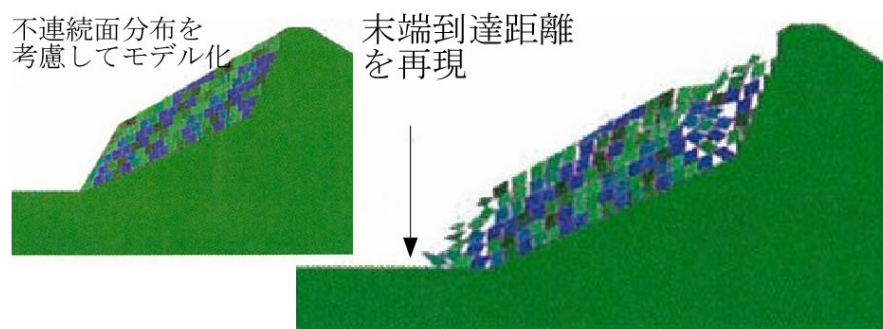


図 3.4.1 不連続面を考慮したモデルと解析事例[36]

一方、図 3.4.2 は、地質調査結果をほぼ忠実に再現したモデルと、ブロックの大きさを 3～5 倍に拡大して適度に簡略化したモデルを用いて、地震力を用いた応答解析の結果を比較して、動的に地震力作用させた場合、ブロックサイズの影響は小さいと述べている[37].

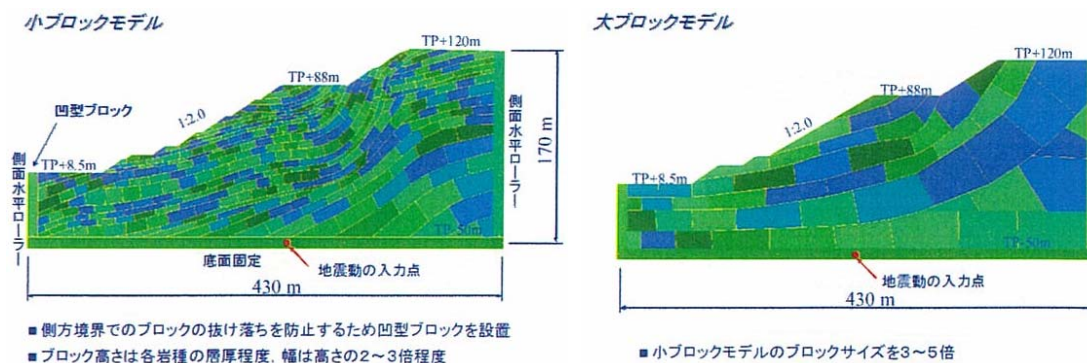


図 3.4.2 ブロックの大きさを変えた 2 種類のモデルの時トン応答解析例[37]

一方、筆者らが経験した崩壊現場においても、同様の結果が得られている。図 3.4.3 は、以下に示す不連続面の調査結果に基づいて作成した崩壊モデルである。

N52W, 傾斜 68W 間隔(n)=0.4m

N60W, 傾斜 56W 間隔(n)=0.7m

ただし、上記の間隔で不連続面を配置したモデルを作成すると、細かい微少なブロックの集合体となり計算に膨大な計算時間がかかる。このため計算に用いた解析モデルは、上記の不連続面間隔(n)を 3 倍して作成した。図 3.4.4 は、崩壊土砂のスケッチと DDA 解析結果の対比図であり、解析結果はほぼ実際に近い状態を表している。

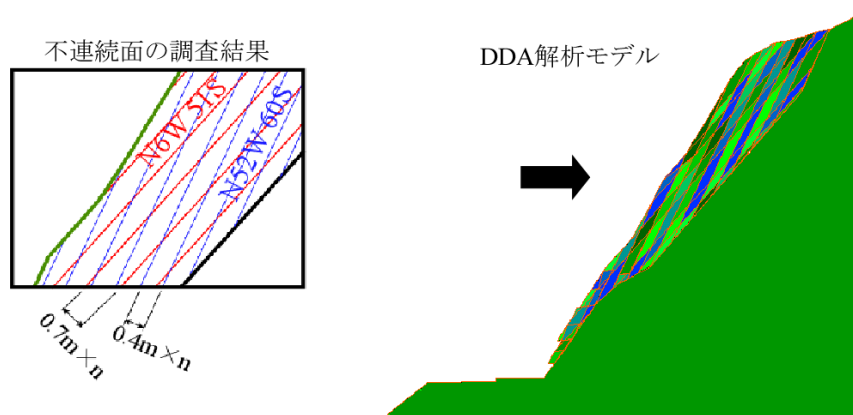


図 3.4.3 不連続面の分布を考慮したモデル(ブロック大きさは 3 倍)

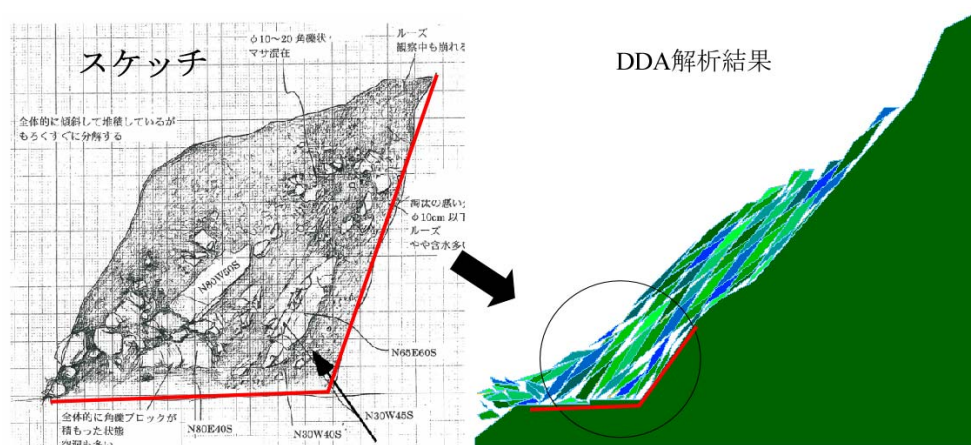


図 3.4.4 赤線部分の崩壊土砂のスケッチ(左)と解析結果(右)

以

上の解析事例からわかるように、不連続面の影響を考慮した移動体のモデル化には、崩壊様式と到達点に影響を与える「形状」と、変形問題や計算時間に影響を与える「大きさ」(すなわち細かさ)の2つの問題がある。解析事例からみると、不連続面のジョイントセットにより決まるブロックの形状は崩壊様式や到達距離に大きく影響するものの、ブロックの大きさについての影響は、いまのところ少ないとみる報告が多い。しかし、このような移動体モデルの粒子形状や大きさが崩壊初期の破壊範囲に与える影響を、DDA解析の結果と模型実験と比較して、破壊の初期段階の範囲は定性的に一致するものの、初期の微少な変形を定量的に評価するためには、ブロック同士のかみ合わせや粒子間摩擦角が全体の変形に与える影響をさらに検討する必要があるとする報告もある[38]。今後の重要な課題である。

3.4.2 事例解析を通してみたモデル作成の留意点

岩盤崩壊が突発的に発生する背景には、破壊に至るまでの長期にわたる亀裂の進展、弱層の劣化があるといわれる。2章でも述べたように、危険な岩盤崩壊の情報はまず地形から得られ、次いで不連続面調査によって範囲を絞り込むという手順で行われる。しかし、崖面の奥に存在する危険な不連続面や弱層の存在や変化が崩壊にどのように影響するかを予想することは難しい。この問題もまた、既往の崩壊事例の地道な蓄積が必要であるが、少しずつその全容が明らかとなっている。例えば、天鳥橋での崩壊後の精緻なモデルを用いた解析では、不連続面の摩擦角の半減が崩壊発生の発端となることが明らかとなった[10][2]。同様にして、第二白糸の崩壊でも弱層の弾性係数が半減することで崩壊に至ることがFEMの解析から推定されている[2]。一方、天城岩(層雲峡)やほぼば隧道などでは、崩壊後の観察結果から背後の崩壊面の半分が風化して劣化すると崩壊に至ることが示唆される。漠然とではあってもこのような目安が整理されれば、数値解析の適用範囲も広がる。事例解析による経験の蓄積が重要である。次に、岩盤のブロックの

転倒崩壊の事例解析を通じて明らかとなった、崩壊過程を再現する上で必要なモデルの留意点について述べる。

(1) 崩壊の概要

2004年5月、北海道東部に位置する海岸沿い道路の覆道坑口脇で岩盤崩壊が発生した。崩壊規模は高さ約20m、幅5～10m、厚さ5～8mで崩壊規模はおおよそ500m³である。崩壊形態は、覆道天端付近を支点とするトップリング崩壊であり、倒壊した岩塊は1辺が5～8m規模の3つの巨大な岩塊に分離して、道路脇の擁壁方向裏側に倒壊した(図3.4.5)。崩壊時に、道路擁壁にあたった衝撃で岩塊の一部が分離し、道路上に落下したが、幸い交通車両はなく被害はゼロだった。崩落岩体の主体部の落下地点はN値=5程度の盛土地盤であったことも幸いし、岩塊は最初の落下でエネルギーのほとんどを失ったものとみられる。

(2) 崩壊ブロックの復元断面

崩壊面後の岩塊状況と、崩壊前の写真から復元された崩壊前地形断面を図3.4.6に示す。もともと、岩塊の上2/3を占めるb,c岩塊が大きく山側に張り出したオーバーハング地形であったこと、その重心位置がc,b岩塊ともに、下部を支えるa岩塊重心より前にあったこと、倒壊岩塊はその崩壊形態そのままに転倒モードにあったことなどがわかる。



図 3.4.5 崩壊地の崩壊直後の状況写真

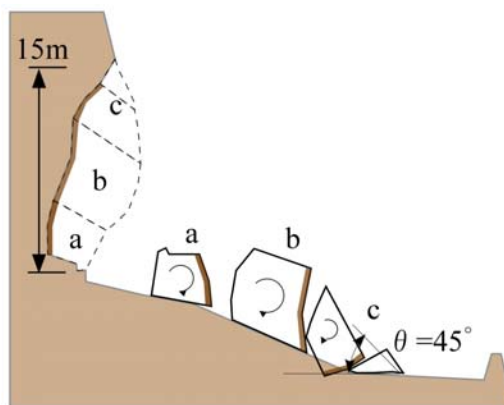


図 3.4.6 崩壊地倒壊方向断面

(3) 崩壊面の特徴から推定される崩壊機構

崩壊後の破壊面の観察から、a,b,cそれぞれの岩塊によって風化状態が大きく異なることがわかった。例えば、最上部c岩塊の背面には、風化による茶褐色化した面がまったくみられず新鮮な岩盤色(黒色)を示す。直下のb岩塊背面もほぼ同様だが、c岩塊近くでは新鮮な岩盤色を示すのに対し、下に行くほど茶褐色化している。そして、一番下のa岩塊背面の風化は著しく進み、面の一部はハンマーで削れるほどに劣化している。

一方、崩壊した岩塊 a・b 間の面には滑った跡が明瞭に確認され、一部は薄く板状に剥がれている。b・c 岩塊間の面にも、滑った跡が全面にみられる。復元した断面図から推定されるこれらの不連続面と、崩壊面に残る不連続面の調査から、b・c 岩塊間の面は $N50^{\circ} W/35^{\circ} N$ か $N70^{\circ} E/40^{\circ} N$ のいずれか、また a・b 岩塊間の面が $N50^{\circ} W/35^{\circ} N$ と想定された(図 3.4.7)。本不連続面の特徴は、倒壊方向に投影すると、いずれも b 岩塊の上下は見掛けの傾斜が平行となる点にある(図 3.4.8)。

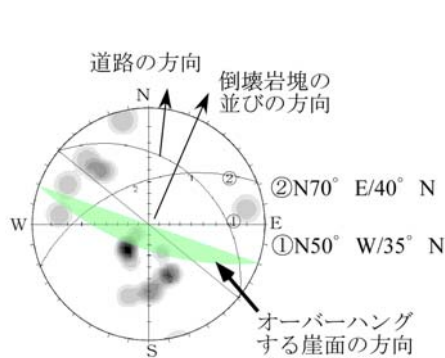


図 3.4.7 落下岩塊方向と崩壊に関与した不連続面

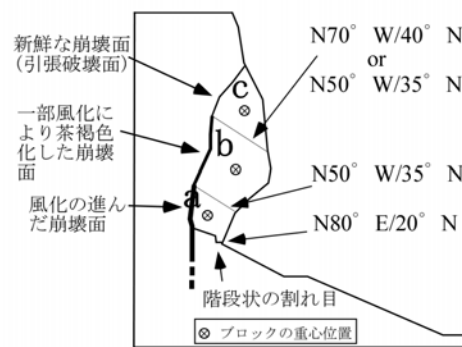


図 3.4.8 崩壊前地形断面と崩壊に関わる不連続面

一方、a 岩塊下側の面、すなわち崩壊岩体脚部の前面にはわずかに滑った跡がみられるものの背後の崩壊面への連続性は認められない。代わりに脚部の前面には、崩壊時に生じたとみられる階段状の割れ目が残っている。この階段状の割れ目は、その位置と形状と崩壊の形態から、中島らが柱状岩体の転倒崩壊機構の考察に際して指摘した”鍵型割れ目”に相当するものと考えられる[40]。もし、そうであるなら、この階段状の脚部は、岩体が倒壊する際に生じた最も新しい割れ目ということになる。以上、観察結果からみた本崩壊の発生機構は次のように考えられる。

- ① a 岩塊背後の割れ目が上に向かって進展する。
- ② 全崩壊岩体の半分近くを占め谷側に大きく張り出した b 岩塊は、その存在自体が持続的な駆動力となって、b 岩塊背後の割れ目の伸展を助長させる。
- ③ a,b 岩体の前傾に耐えられなくなった c 岩塊の引っ張り破壊により全体が倒壊する。

(4) 二次元 DDA による崩壊機構の推定

全体の崩壊シミュレーションを行う前に、観察結果をもとに以下の 2 つのケースについて崩壊機構の検討を行った。

ケース(a)：背面亀裂の進展による崩壊モードの変化、

ケース(b)：支点となる脚部のモデル形状による崩壊モードの変化。

ケース(a)は、さらに、最上部の c ブロックを固定した場合、c,b の両ブロックを固定し

た場合に分けて行い、c,b 両ブロックを固定すると a ブロックだけが動くことはないが、c ブロックを固定すると中央の b ブロックがわずかに前に変位する結果を得た。本結果から、b ブロック背面に割れ目が伸展とした段階で全体がかなり不安定な状態となったことが伺える。

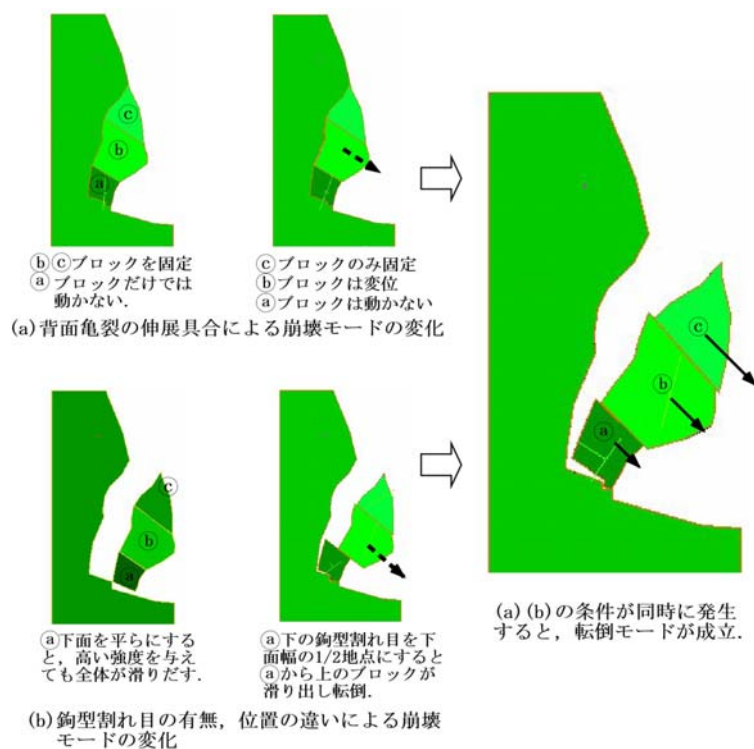


図 3.4.9 二次元 DDA による崩壊機構の検討

一方、ケース(b)では、a ブロック脚部を平坦にした場合と、鉤型割れ目をモデル化した場合の 2 ケースについて行った。その結果、脚部を平らにすると全体がすべり出すが、鉤状の割れ目をモデル化すると、全体がわずかにすべり出した後 a ブロックの下端を引っかけるようにして転倒する結果が得られた(図 3.4.9)。

以上から、①a 岩塊脚部前面の鉤型割れ目をモデル化しなければ転倒を再現できない。
②a-b 間割れ目面と b-c 間割れ目が、解析断面上で平行でなければ一体となった転倒が生じないなど、崩壊に必要な条件が明らかとなった。

これらの検討結果をもとに、全体検討を行った。検討に用いた DDA の入力定数を表 3.4.1 に示す。なお、本ケースでは、岩体崩落時のエネルギー損失に粘性係数(μ_d)を用いた。まず、図 3.4.6 に示した主要岩塊の最遠地点から崩壊頭部までの見通し角度を 45° として速度残存係数(α)を 0.9 とした。なお、落下高さは 15m、断面上での崩壊面積は 28m^2 である。また、等価摩擦係数(μ_v)は、0.21~0.3 である。以上より、式(3.2.1)を用いて粘性係数(μ_d)を約 0.25 と求めた。

解析にあたって、時間刻みは自動とし許容変位(DAR)を 0.002 とした。(これは、最小時間刻みを $\Delta t=0.002\text{sec}$ としたのと同じである)。一方、垂直剛性バネ(ペナルティバネ)(Kn)は、静的解析時には $E < p < 100E$ の範囲で選択するのが良いとされるが、動的解析の場合には目安がない。そこで、ここでは b ブロックを高さ 10m より落下させ、速度比を 0.1 とした場合に再現可能な垂直剛性バネを求めた。また、摩擦角は、 50° とした。

表 3.4.1 DDA の入力定数

質量	27 kN
弾性係数	5000 MPa
ポアソン比	0.2
垂直剛性バネ	5000 MN/m
速度残存係数	0.9
等価摩擦係数	0.21~0.30
粘性係数	0.25

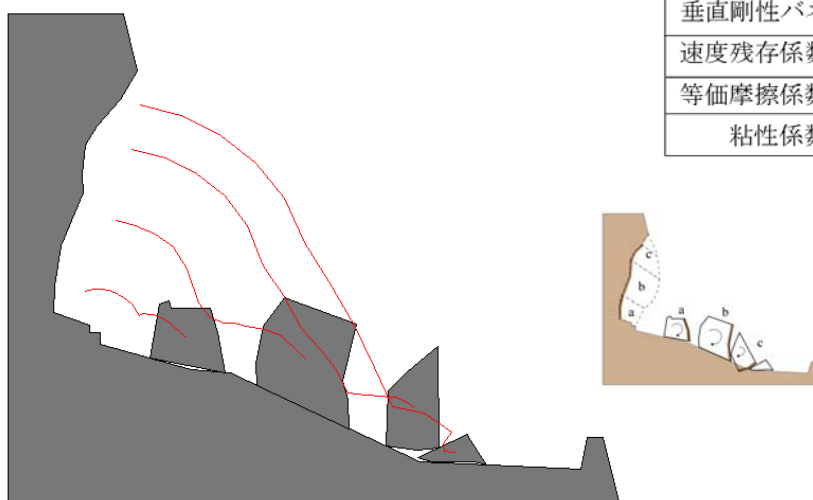


図 3.4.10 DDA による崩落全体のシミュレーション

本解析で最もその値が影響するのは、a-b ブロック間の摩擦角である。すなわち、摩擦角を 35° 以下とすると、bc 岩塊が滑るように落下するため a 岩塊は転倒しない。対して摩擦角を 50° 以上とすると、落下する b 岩塊が a 岩塊を引っかけるようにして a 岩塊の転倒が始まる。このとき、粘着力や引っ張り強度は、ゼロとしても別に値を設定しても変わらない。

調査結果に基づく事例検討から、崩壊機構を説明するためには、

- ① 背後の割れ目が崩壊面の 1/2~2/3 に達した段階で引張り破壊が発生したこと、
- ② 転倒破壊の説明では脚部の割れ目形状をモデル化すること、
- ③ 滑り出しから回転に至る各岩塊の挙動の再現には、適切な摩擦角の値を設定すること、

などが明らかとなった。

①の結果は、2 章で述べたほぼ隧道や天城岩の事例と共通する事象であり、解析条件というより崩壊に至る段階をどう想定するかという問題である。

②は中島らが観察から明らかにした事象を DDA により確認したものであり、トップリング崩壊が予想される場合には脚部が着目点となることを示している。この問題が難しい点は、破壊の最終形状をあらかじめモデル化しておかないと、正しい解析結果が得られない、という点である。現時点では岩体の重心と、予想される崩壊形態などの情報から、経験的にモデル化の有無に対する判断が必要となるやっかいな部分である。

③は転倒と滑りが共に生じたなかでの現象であり、運動の遷移を決定づける重要な要素となる。しかしこれもまた、現段階では決定法がない。

このような事例解析を通じたモデル作成上のポイントや入力値の設定法に関しては、未だ情報が不足した段階にあり、さらなる今後の事例検討が必要となる。

なお、本事例では、現地で計測される傾斜角と倒壊時の滑り出し方向とが異なっている。このような方向の異なる複数の不連続面の存在が崩壊方向に与える影響については、二次元解析では検討困難であり、後に三次元 DDA を用いて検討する。

3.4.3 3.4のまとめ

本節では、岩盤の崩壊発生時の崩壊様式や到達距離に影響する移動体のモデルと、崩壊発生過程に影響するモデルについて述べた。

崩壊後にばらばらになって崩れる移動体をモデル化する際、一つ一つのブロックをどの程度の大きさで表すかということは常に問題となる。なるべく実際に近づけることが望ましいが、数が膨大だと計算時間にも大きく影響する。事例からみると、ブロックの大きさよりも形状の方が崩壊様式や到達距離に与える影響は大きく、大きさについては代表的な大きさの数倍までは許容するようである。ブロックの形状は、不連続面のジョイントセット、間隔、長さによって決まるため、事前事後、いずれの解析においても不連続面の調査が重要であることがわかる。

また、複数ブロックの到達解析には、不連続変形法(DDA)では、粘性係数が用いられるのも事例に共通している。これは、大小個々のブロック同士の衝突による減衰を正確に評価することが難しい一方で、全体をマスとして扱う際には粘性係数が適しているためと考えられる。結果的に、粘性係数による解析法は、Scheidegger(1973)らの等価摩擦係数法を、可視化した解析に相当する。

3.5 不連続変形法の崩落および落石問題への適用と課題

3.5.1 落石解析に用いられる入力値

DDA を落石問題に適用したのは、Chen & Ohnishi らが最初であり、それ以来数多くの研究がある。DEM や DDA を用いた落石における研究は、モデル形状よりも入力値の利用法、決定法に力点がおかれたものが多い。これは、落石解析が質点系シミュレーションを中心に発展してきたためと推察される。

一方、DDA では 3.2.4 で説明したように、粘性係数と速度エネルギー比の 2 つの入力値が用いられる。ここで、粘性係数は質量比例型剛性減衰係数とも呼ばれ、運動中の物体のすべての挙動に働く減衰を指す。一方、速度エネルギー比は、剛性比例型減衰係数とも呼ばれ、衝突時のエネルギー減衰にのみに働く。

最初に DDA を落石問題に適用した Chen らは、1 つの落石を対象とする場合には粘性係数を、複数の岩塊が落下するケースでは粘性係数と速度エネルギー比の両方を用いている。その後の研究にも、粘性係数を中心した、あるいは粘性係数と速度エネルギー比の両方を使用した研究は多い[41][42][43][44][45][46][47]。

佐々木らや萩原らも、同様にして粘性係数のみの場合や速度エネルギー比と併用した場合の落石のエネルギー損失の評価法について検討している。速度エネルギー比が衝突時のみのエネルギーロスの評価に用いるのに対し、粘性係数は植生や樹木の存在など斜面性状の変化による減衰影響の評価を目的とすることが多い。ただし、速度エネルギー比が現場実験から速度比として計測可能であるのに対し、粘性係数は現地で測定できる値ではない。しかしながら、前節で述べたように粘性係数には等価摩擦係数と一定の関係があることが指摘されている。

一方、呉ら、Fukawa ら、萩原らは速度エネルギー比のみを用いた落石シミュレーションを試みている[48][49][50]。速度エネルギー比(E_v)については、我が国のこれまでの実験結果から土砂で、 $E_v=0.71$ 、岩盤で $E_v=0.66$ とする報告もあるなど、ある程度その性質は知られているが、その一方で速度比自体の特性にも未解明の部分が多い。

以下、実際の適用事例をとおして、その適用性と問題点を探る。

3.5.2 DDA の岩盤崩落、落石問題への適用事例

落石シミュレーションに関する問題の一つに、入力値の決定法の問題がある。予測シミュレーションでは、入力値は一般に、類似斜面での値が用いられることが多い。ここで、類似斜面の条件とは、高さや勾配を含む斜面の幾何形状、露岩や崖錐や植生などの状況、岩塊の規模と形状などであり、時に発生源での運動開始状態も含まれる。ここで、最も重視されるのが斜面の幾何形状と、斜面の性状である。3.3.2 で説明したように、質点解析で用いられる法線、接線方向速度比(R_n, R_t)には、ほぼ性状と対応したデータの蓄積があり、

これによって容易に入力値の目安が得られる。しかし、DDA で用いる粘性係数や速度エネルギー比には、このような目安を得るうえでの経験の蓄積が乏しい。しかも、質点解析と異なり、岩塊の形状や規模による影響が今のところは全くといってよいほど不明である。それ故、崩落を対象とした DDA の入力条件の設定には、落下開始点と終端間での試行錯誤的な予備解析による探索が欠かせない(図 3.5.1)。

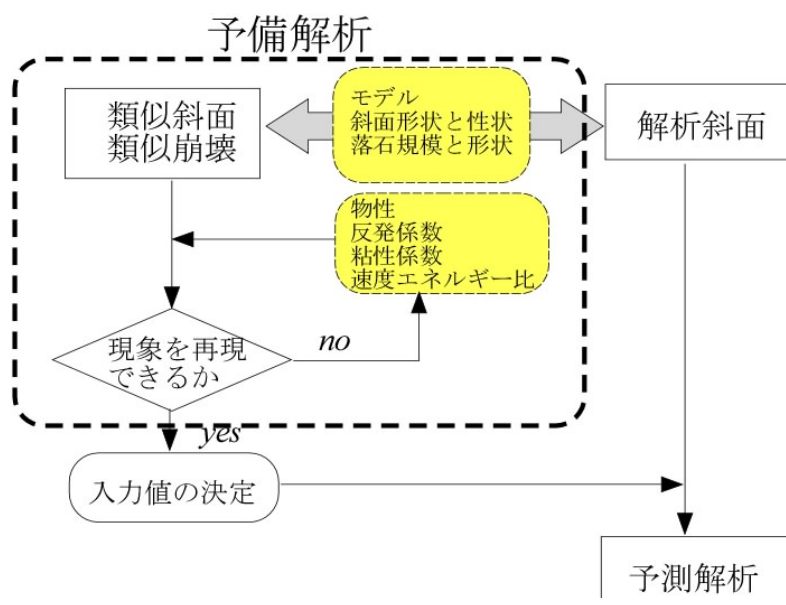


図 3.5.1 予測解析の手順

(1) 速度エネルギー比を試行錯誤で求めた事例

事例は、海岸沿いの道路から 12～15m 離れた高さ 40m ほどの急崖上部に検出された危険岩塊が崩落した時の到達影響範囲の想定、すなわち道路への影響評価である[51]。

想定岩塊が 5m×7m×2m と大きく板状であることから質点解析法の適用は困難であるため、DDA を用いた。一方、図 3.5.2 に示したように、想定危険岩塊の下には旧崩壊跡地地形があり、崖下と道路の間にはそこから落下したとみられる同規模の岩塊がある。

本事例では、落下岩塊と発生位置が既知であることから、崩落時の状態が図 3.5.3 のように想定できる。そこで、図 3.5.1 の予備解析のフローに従って解析を進めた。

DDA では前述のように、速度エネルギー比と粘性係数の 2 つの入力値が扱えるが、本事例では速度エネルギー比を用いた。手順は、まず、最初に既往の落下岩塊の挙動に対する再現解析を行い、次に、想定された入力定数に安全率を考慮した値を用いて危険岩塊に対する予測シミュレーションを行うという手順である。

なお、本事例では、時間刻み、バネともに自動計算を用いている。



図 3.5.2 崩落跡と上部の危険岩塊

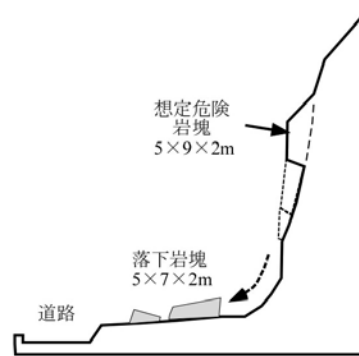


図 3.5.3 断面図 崩落岩塊と危険岩塊との関係

(2) 再現解析

事前解析により，崩壊挙動と最終位置の再現に必要な入力定数(速度エネルギー比)を求めるため，値を 0.4～0.6 と変えて再現解析を行った．その結果，停止位置の再現に必要な速度エネルギー比を $Ev=0.5$ と決定した．

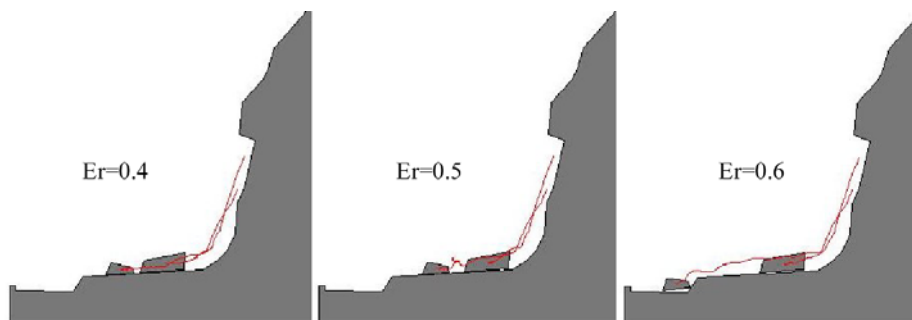


図 3.5.4 旧崩壊の速度エネルギー比を変えた再現解析

この結果をもとに，予測解析を行った．想定危険岩塊をモデル化し，速度エネルギー比を $Ev=0.5$ として落下させ，到達位置を予測した．その結果，懸念される岩塊は道路到達時には 1.0m/s 以下となることから，ポケットは幅としては十分に機能するものと判断した．このため対策は，危険岩塊直下に衝撃吸収のための砂を敷設し，ポケット内の整備と同時に道路脇に蒲団籠工を敷設(2 段($h=1\text{m}$))する待ち受け対策とした．

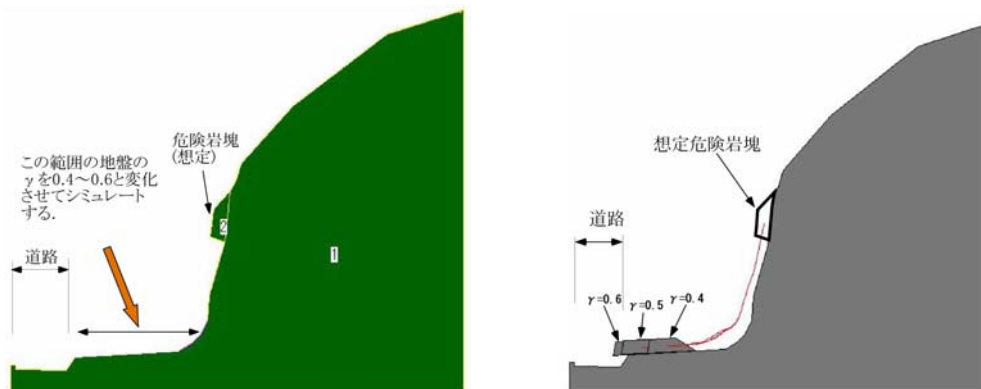


図 3.5.5 速度エネルギー比による検討結果

本解析では、粘性係数ではなく速度エネルギー比を用いている。これは、後述するように、落下途中に極端な凹地形がある場合には粘性係数の適用が難しいためである。ちなみに本現場で旧崩壊の岩塊到達を説明可能な粘性係数は $0.01 \sim 0.10$ と範囲が広く、この値は到達地点の見通し仰角から求めた値($\mu_d=0.2$)よりかなり小さい。

一方、速度エネルギー比を用いた場合は、前述のようにほぼ入力値と到達距離には一定の関係が見られる。しかし、3.4.2 で示した崩壊事例同様、ここでも摩擦角の値は重要である。すなわち、岩塊が落下する直下の風化岩の摩擦角を $\phi=35^\circ$ とした場合と $\phi=20^\circ$ とした場合では、前者では前方転倒、後者では滑動、というように運動が大きく異なるためである。これは、主岩塊が落下衝突する際に、ほぼ真上から落下するためちょうどブロック重心とブロック角との関係が入射角度=反射角度となり、その後の挙動が接触時の摩擦によって決定されるためと考えられる。両者の軌跡に大きな差はなく、影響は到達距離と崩落岩塊の最終形にのみに表れている。落下岩塊の主崩壊面の位置からみると、落下衝突後の挙動は滑動が正しいと考えられる。

これらのことから、3.4.2 での事例解析同様、摩擦角が運動の遷移を左右する重要な要素となることがわかる。

3.5.3 岩塊崩落シミュレーションに用いる速度エネルギー比の性質

DDA では岩塊衝突時のエネルギー減衰を再現するために、粘性係数と速度エネルギー比が用いられる。しかし、粘性係数には等価摩擦係数との関係を目安に決定する方法があるものの、速度エネルギー比については報告も少なく、設定のための適当な目安がない。

現在のところ、速度エネルギー比は DDA 特有の入力値であり、質点解析などで用いられる法線方向速度比などとは基本的に異なる物理量そのものである。ただしそれ自体は、線速度自乗比として扱われるため計測可能な値であり、線速度比として論じられることも

多い。ただし、回転エネルギー比が論じられることはほとんどない。

本研究では、このような速度エネルギー比の性質を調べる目的で、危険岩塊の除去現場を用いた現場実験を行っている。詳細は4章で述べるが、ここでは図3.5.6に示す現場(a)(b)で計測した結果をもとに行った DDA と質点解析による再現シミュレーション結果をもとに、その問題点を述べる。なお、再現シミュレーションで比較したのは法線方向速度比(R_n)、速度エネルギー比(E_v)、粘性係数(μ_d)の3つである。

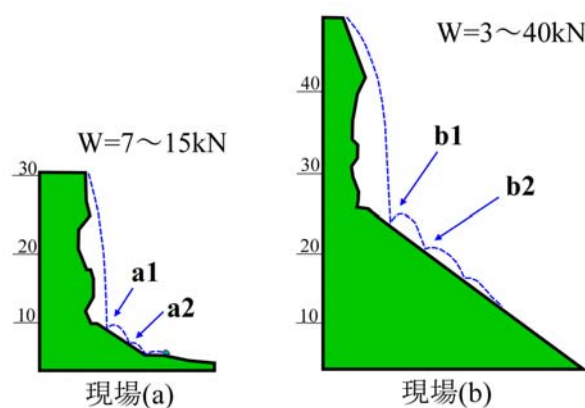


図 3.5.6 速度比を計測した現場の代表断面

(1) 現場 (a) の再現解析<粘性係数(μ_d)と速度エネルギー比(E_v)>

落下岩塊の規模は $0.8 \times 0.8 \times 0.6\text{m}$ であり、重量は約 10kN である。長短比は $1:1.3$ と落下岩塊の中ではほぼ平均である。

第一衝突点である a1 地点までの落下高さは約 16m 、水平落下距離はオーバーハングであるため約 2m ほどである。A1 地点に落下後の岩塊は、水平距離にして約 12m ほどの距離を 2~3 回バウンドしながら飛び、末端に容易されたポケットに衝突して止まる。

入力に用いた物性値は岩石試験を基に決定し、岩塊、地盤ともに同じ値を用いた。弾性係数は 22GPa 、ポアソン比は 0.2 である。また、落下岩塊形状は、落下中の岩塊の面積に等しい 36 角形とした。また、垂直剛性バネ(kn)は、この 36 角形を 1m 垂直落下させて、反発係数 0.5 (すなわち速度自乗比 0.7) が得られる値を再現可能な正解値とした。

<粘性係数による再現解析>

本現場では、a1 地点での落下速度が約 18m/s 、a2 地点で約 7m/s である。これを、速度と落下高さの関係図から速度残存係数(α)でみると、a1 地点が $\alpha=1.0$ 、a2 地点が $\alpha=0.5$ ということになる。この値を用いて、落下地点から斜面末端までの傾斜角を 59 度として等価摩擦係数(μ_r)を求めると $\mu_r=0.32$ となる。これらの値から、a1 地点での粘性係数(μ_d)が $\mu_d=0.23$ 、a2 地点では $\mu_d=0.12$ が求められる。再現解析は、これらの値を用いて行った。

粘性係数による再現結果を図3.5.7(左)に示す。粘性係数は値が小さいほど a1 衝突点での反発は小さい。 $\mu_d=0.12$ では a1 で大きく跳ね、解析速度も実際よりはるかに大きな

る。しかし、 $\mu d=0.12$ でもまだ大きい。そこで、最適な粘性係数を試行錯誤で探索した。しかし、その結果は $\mu d=0.5$ としたとき軌跡は合うが速度が低く、 $\mu d=0.4$ では速度はあうが軌跡が大きいという結果となった[52]。

これまで、落石シミュレーションに粘性係数を用いた事例は多いが、いずれも途中に大きな地形変換部あるケースではなく、ほぼ一様な傾斜の斜面である。落下途中に大きな地形変換点がある場合、粘性係数による解析は難しいと思われる。

<速度エネルギー比(Ev)による再現解析>

粘性係数と異なり、速度エネルギー比については図中に示したように、速度自乗比(γ)として計測値が得られている。a1 地点で $\gamma=0.11$ ，a2 地点で $\gamma=0.51$ である。ここでは、速度エネルギー比を、斜面全体に $\gamma=0.51$ とした場合、まだ全体に $\gamma=0.11$ とした場合、そして、a1,a2それぞれの地点に $\gamma=0.11$ ， $\gamma=0.51$ を入力した場合の3ケースについて検討した。

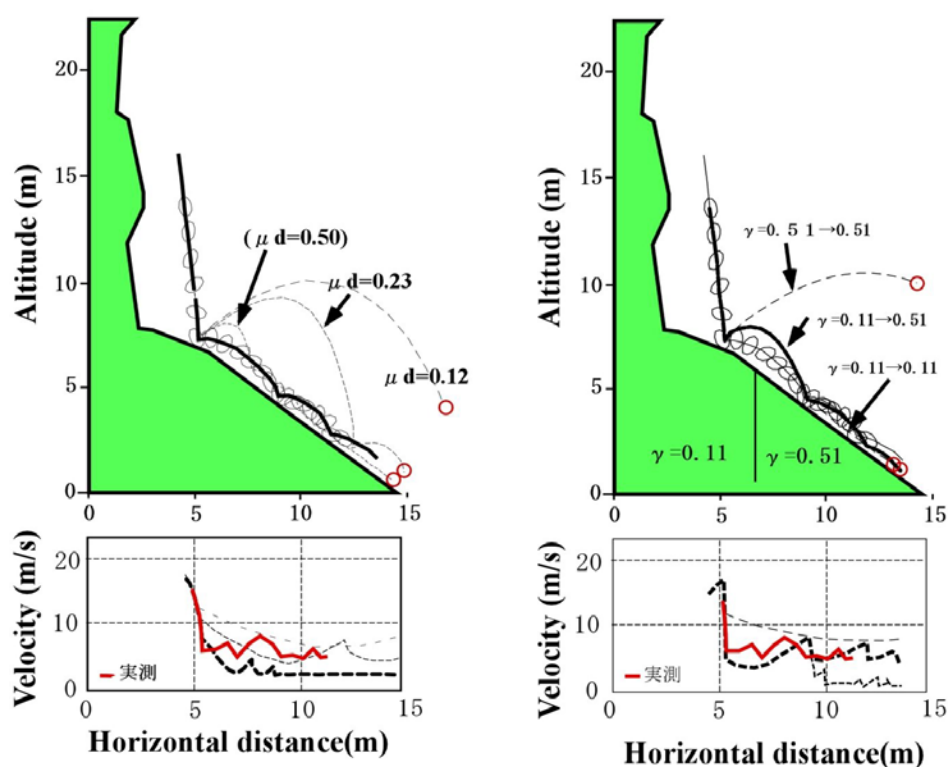


図 3.5.7 実現場の再現実験(粘性係数と速度エネルギー比の比較)

結果は、図 3.5.7(右)に示すように、斜面全体を $\gamma=0.11$ とすると a1 地点では良好な再現結果が得られるものの a2 地点では跳ねずに転がる。また、 $\gamma=0.51$ とすると a1 地点で大きく跳ね、斜面内には落下しない。一方、a1,a2 地点それぞれの値を入れたときの再現結果は、軌跡速度ともに最も再現性が高い[52][53]。しかしながら、このような入力値の設定法が現実的でないことは明らかである。

(2) 現場 (b) の再現解析<速度比 (Rn, Rt) と速度エネルギー比 (Ev)>

現場(a)での解析例をもとに、今度は同様の地形を持つ現場(b)での解析を行った。ここでは、質点解析と DDA との比較である。落下岩塊の岩塊規模は $1.8 \times 1.2 \times 1.2\text{m}$ であり、重量は約 40kN である。長短比は 1:1.5 である。

第一衝突点である b1 地点までの落下高さは約 24m、水平落下距離は約 4m ほどである。b1 地点以後の水平距離は 25m~30m であるが、観察が可能だったのは最初の 15m ほどである。なお、岩塊はバックホウで落下させているため初速がついており、解析では $V_x=2.0 \sim 3.0\text{m/s}$ 、 $V_y=2.5 \sim 3.5\text{m/s}$ を与えた。入力に用いた物性値は岩石試験を基に決定し、岩塊、地盤ともに同じ値を用いた。弾性係数は 20GPa、ポアソン比は 0.3 である。また、落下岩塊形状は、落下中の岩塊の面積に等しい 36 角形とした。また、垂直剛性バネ(kn)は、この 36 角形の模擬岩塊を 1m 垂直落下させて、反発係数 0.5(すなわち速度自乗比 0.7)を再現可能な値とした。

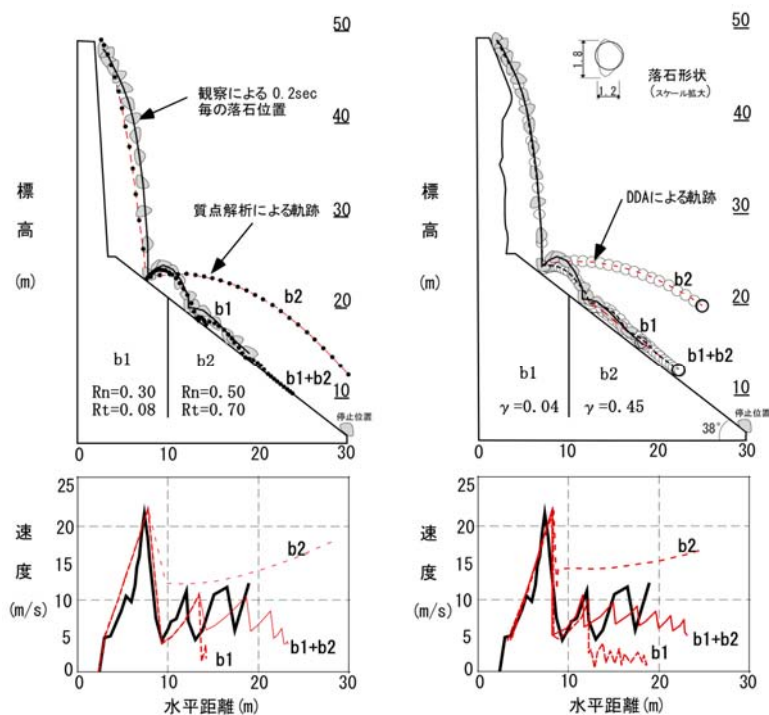


図 3.5.8 実現場の再現実験(反発係数と速度エネルギー比の比較)

<法線方向速度比(Rn)と接線方向速度比(Rt)による再現解析>

b1, b2 地点で計測した Rn, Rt の平均値を、図 3.5.8. (左) 中に示した。Rn, Rt とともに b2 地点での値が大きい。これは、速度エネルギー比と同じである。ここでも、解析ケースは、b1 地点のみのケース、b2 地点のみのケース、そして、b1, b2 それぞれの入力値を与えたケースである。

結果は、やはり b1 だけだと初回の反発は良好に再現できるが、b2 では大きく跳ねて落

下しない．もっとも良好な再現結果は、b1,b2 にそれぞれの値を入力した結果であった．

＜速度エネルギー比による再現解析＞

速度エネルギー比は、a 現場では 5 倍の開きがあったが、本現場でも b1 地点で $\gamma=0.04$ 、b2 地点で $\gamma=0.45$ と、やはり 5 倍の開きがある．ここでも、同じようにして b1,b2 それぞれの値を入力した場合と、各衝突地点にそれぞれの値を入力した場合に 3 ケースを試したが、結果はこれまでと同様であった(図 3.5.8. (左))．

以上の結果からみると、現場(a)や現場(b)のように大きな地形変換点が存在し、入射角度と速度によって速度比や速度エネルギー比が大きく異なるケースでは、計測されたいずれの入力値を用いても、いずれか一方の速度と軌跡しか再現できない[54]．

本結果から、この原因は主に速度比側の特性にあるものと考えられる．

3.5.4 落石のモデル形状が反発減少に与える影響

DDA は、質点解析と異なり落石の形状を考慮できることが特徴である．これは落石の形状がもたらす運動の複雑な変化を直接計算に取り込むという点で大きな利点であり、落石対策便覧では、初期姿勢を変化させることで形状効果を解析上のばらつきとして表現可能である、としている．しかし、衝突地点での反射軌跡や速度に与える形状の効果や影響について、詳細に調べた例はほとんどない．その一方で、前節で述べた速度比の詳細な性質を調べるためには、形状がもたらす影響を極力排除する必要がある．ここでは、速度比の特性を調べるために行った形状(多角形)が挙動に与える影響に関する予備解析結果をとおして、モデル形状の影響を考察する．

＜解析に用いた形状と物性値＞

これまでの報告では、落石形状に正 6 角形～正 20 角形を用いた例が多い．ここでは、まず正 12 角形と正 20 角形の、落下衝突時の軌跡や速度比に与える影響を比較する．

条件	密度	26kN
	弾性係数	10000 MPa
	ペナルティバネ	10000 MN/m
	時間刻み	自動 (許容変位 0.005)

初期衝突地点条件

速度エネルギー比 0.15
摩擦角=30°

なお、本実験は 4 章、5 章で述べる現場(a)でのデータ 1711 の再現実験に先立って行ったもので、観察結果をもとに水平方向初速(1.4m/s)と、回転角速度(-9.8rad/s)を与えている．解析は、以下のように初期姿勢を変えて落下させることで行った(図 3.5.9)．

12 角形・・・内角=30° であり、5° ピッチで 7 回姿勢を変える．

20 角形・・・内角=18° であり、3° ～5° ピッチで 8 回姿勢を変える

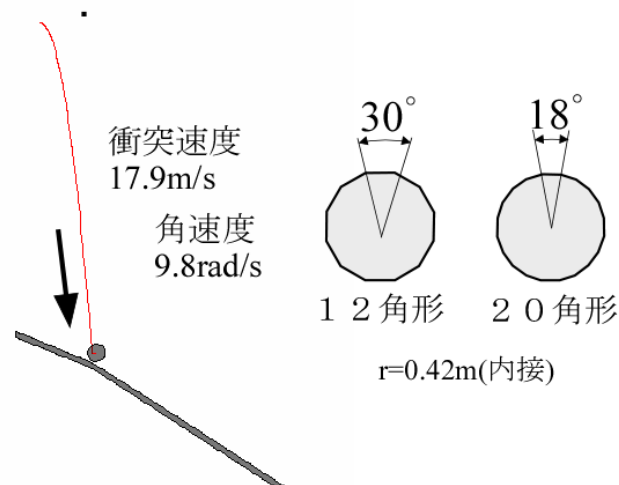


図 3.5.9 多角形の解析実験モデル

<実験結果>

実験結果を図 3.5.10 に示す。図中の青で示した部分は、以下のとおりである。

上限 $\alpha = \beta$

下限 $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \alpha}{e}\right)$

上限は、完全弾性反発時の反射角度であり、下限は非弾性反発時の反射角度(摩擦がないとき)である。本来、DDA は弾性解析であるため、入射角度(27.5°)と反射角度は一致し、上限に沿って反発するはずであるが、回転と接触状態の姿勢変化によって反射角度は変化する。このため、反射速度が速度エネルギー比相当の減少速度、かつ反射速度が上限～下限間で反射するものに関しては正解とみなすことにした。しかし、このように条件をゆるめても成功例は、12 角形で 5/7 回(71%)、20 角形で 5/8 回(62%)と少ない。

<接触状態による失敗例>

表 3.5.1 に、本実験の判定結果を示す。それぞれ、速度と軌跡について判定を示した。反射速度を 1,2 の 2 つに分けている理由は後述する。

多角形の接触状態には、角一辺、角一角、辺一辺の 3 タイプがあるが、本実験で扱ったのは角一辺と辺一辺接触の 2 タイプである。このうち、角一辺接触では一部を除いて成功例であり、逆に辺一辺接触ではほとんどが反射速度、反射軌跡ともに失敗例となっている。

また、△判定のうち 12 角形の A0,S05 は辺一辺接触後、ある距離を滑った後に飛びだしている。最初の接触後の滑動時の速度エネルギー比は $Ev=0.15$ であるが、次に飛び出すときは $Ev=0.4\sim0.6$ となり反射速度判定では no だが、軌跡は反発係数の影響範囲で飛びだしている。また、20 角形の A06,A18,A15 は、後述するが、拡大しなければわからないレベルでの角一辺接触状態であり、最終的に $Ev=0.04\sim0.08$ と判定されるものの解析自体は正しく行われている。

表 3.5.1 多角形モデルの衝突時の正否判定

	番 号	観察される 接触状態	反射速度		判定		
			1	2	速度	軌跡	全体
12角形	A15,S15,S10	角-辺	Ev=0.15	—	ok	ok	○
	A0,S05	辺-辺	Ev=0.15	Ev=0.4~0.6	no	ok	△
	A05	辺-辺	—	—	no	no	×
	A10	角-辺	Ev=0.06	—	no	ok	×
20角形	A05,A20	角-辺	Ev=0.15	—	ok	ok	○
	A12	辺-辺	Ev=0.06	—	no	no	×
	A10,A0	辺-辺	—	—	no	no	×
	A06,A18,A15	角-辺	Ev=0.15	Ev=0.11 ~0.15	ok~no	ok	○~△

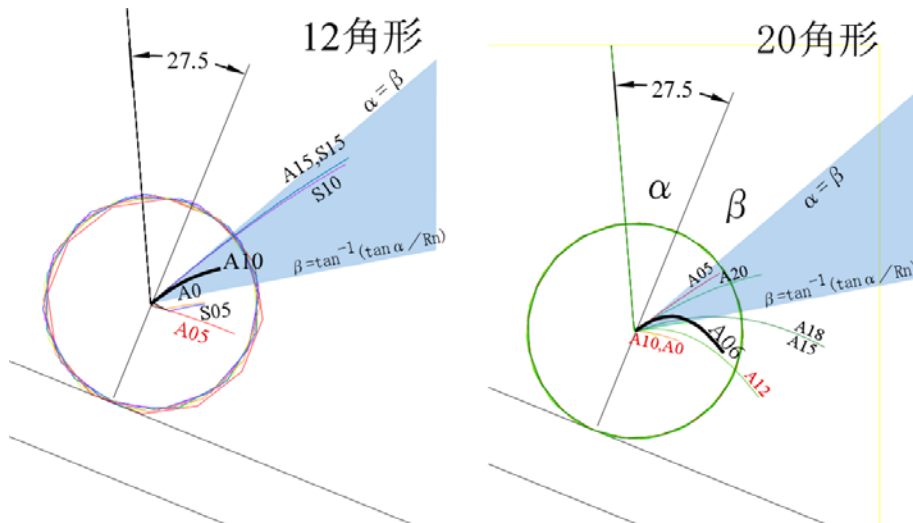


図 3.5.10 12角形と20角形の反射軌跡にみる比較

図 3.5.11 は、このような失敗例を拡大図化したものである。(a),(b)は、辺-辺接触による挙動である。(a)は、滑った後飛び出す例であり、これを△とした理由は、実際の観察でこのような例はしばしば見られるからである。ただし(b)のように辺-辺接触で速度エネルギー比以上の減衰が生じる例は他でもしばしばみられ、これについては DDA 自体の問題である可能性が高い。

一方、(c)は、当初は辺-辺接触同様のエラーと見られていたが、これもタイムステップ単位で追跡すると、解析としては正常に行われていることが明らかとなった。

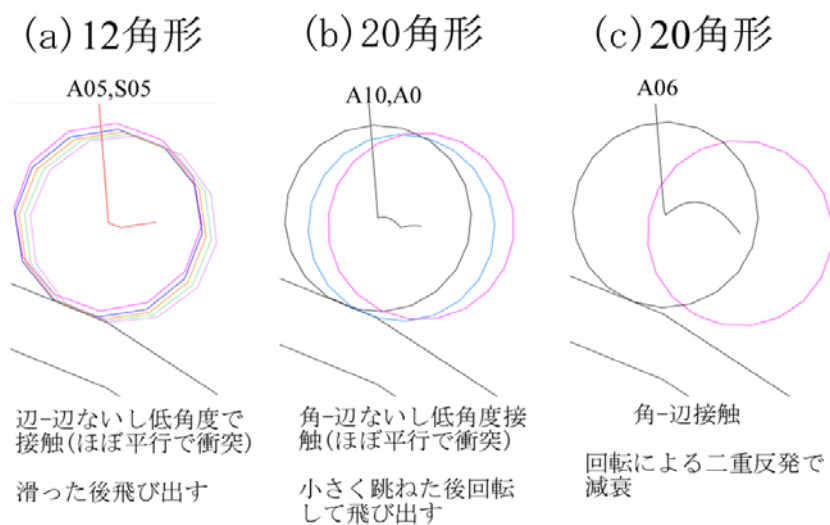


図 3.5.11 多角形モデル(上手くいかなかったケースの軌跡)

図 3.5.12 は、c)の状態を拡大して説明した図である。本図では、17.9m/s で飛び込んだ岩塊が、最初の衝突で 7.1m/s に減じ、回転により飛び出す時にはさらに 5.0m/s にまで低下している状態が描かれている。最終的な飛び出し速度が 5.0m/s であるため、解析結果の見かけ上の速度エネルギー比は 0.08 となり、このため想定以上に減衰した失敗例のように見えるが、解析結果から求めた速度エネルギー比はそれぞれの位置で 0.16 と 0.50 であり、各ステップでの計算は正しく行われている。

このようなケースは、入射角度が小さく速度の速い場合に特に多くみられ、その傾向は 36 角形にすると増える。ただし、これには時間刻みやバネなどの影響も大きいことがわかってきており、この点については今後の課題である。

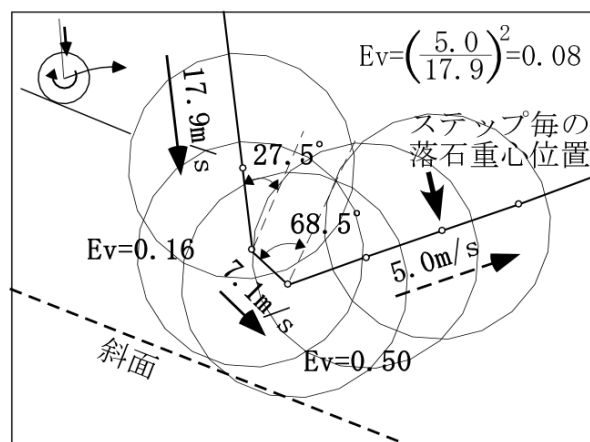


図 3.5.12 衝突時の姿勢変化が速度に与える影響

3.5.5 落石モデルの形状がシミュレーション結果に与える影響

このような多角形の形状が全体軌跡に与える影響はどのようなものであろうか。次に、入射角度と速度の関係で安定した結果を得やすい、地形変換点のない比較的ゆるい実斜面の解析を行った結果を示す。使用したのは、図 3.5.13 に示す 5,8,12,20,36 角形の 5 種類である。

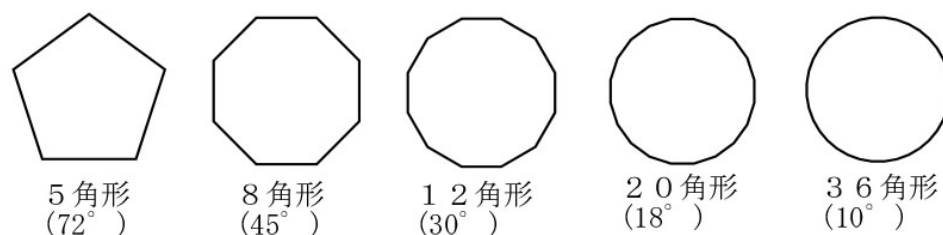


図 3.5.13 実験に使用した形状 ()内は内角

検討は、落下地点での初期姿勢を 3° ずつ回転させる方法で行った。

5 角形	24 回
8 角形	15 回
12 角形	10 回
20 角形	6 回
36 角形	3 回

用いた解析条件は、以下のとおりである。

時間刻み(Δt)は自動設定とし、DAR は 0.001sec、鉛直バネは $1 \times 10^7 \text{ t/m}$ で固定、弾性係数は $1 \times 10^6 \text{ t/m}$ 、摩擦角 30° である。

解析は、4 章で述べる現場(c)で行った。本例での着目点は、c1 地点である。すなわち、c1 地点で大きく落下した岩塊は、衝突時の姿勢を受けて回転が変化する。このため、c1 地点以後の速度軌跡に大きく影響する。

解析結果を、図 3.5.14 に示す。速度軌跡としてはいずれも良好に見えるが、解析時の挙動は大きく異なる。5 角形は、滑って跳ねるだけで回転はほとんどない。速度のばらつきも均等である。8 角形も同様であるが、一部に回転の影響が出始め、このために著しく高い、あるいは低いケースが生じ、このため速度の分布幅が 5 角形に比べてやや広い。本格的に回転が始まるのは 12 角形以上からである。c1 地点以後の速度分布の幅が 12 角形以上で狭くなるのは、回転の影響によるものである。実際、20 角形以上になると運動中の回転が全体にスムーズになる。これは、20 角形以上ではより形状がより円形に近づく、形状の効果が表れにくくなるためとみられる。ただし、36 角形になると、c1 地点での落下挙動が極端に狭くなり、その後の挙動も斜面下方に向かって増速し、ばらつきようになる。回転の影響が卓越してくるためとみられる。

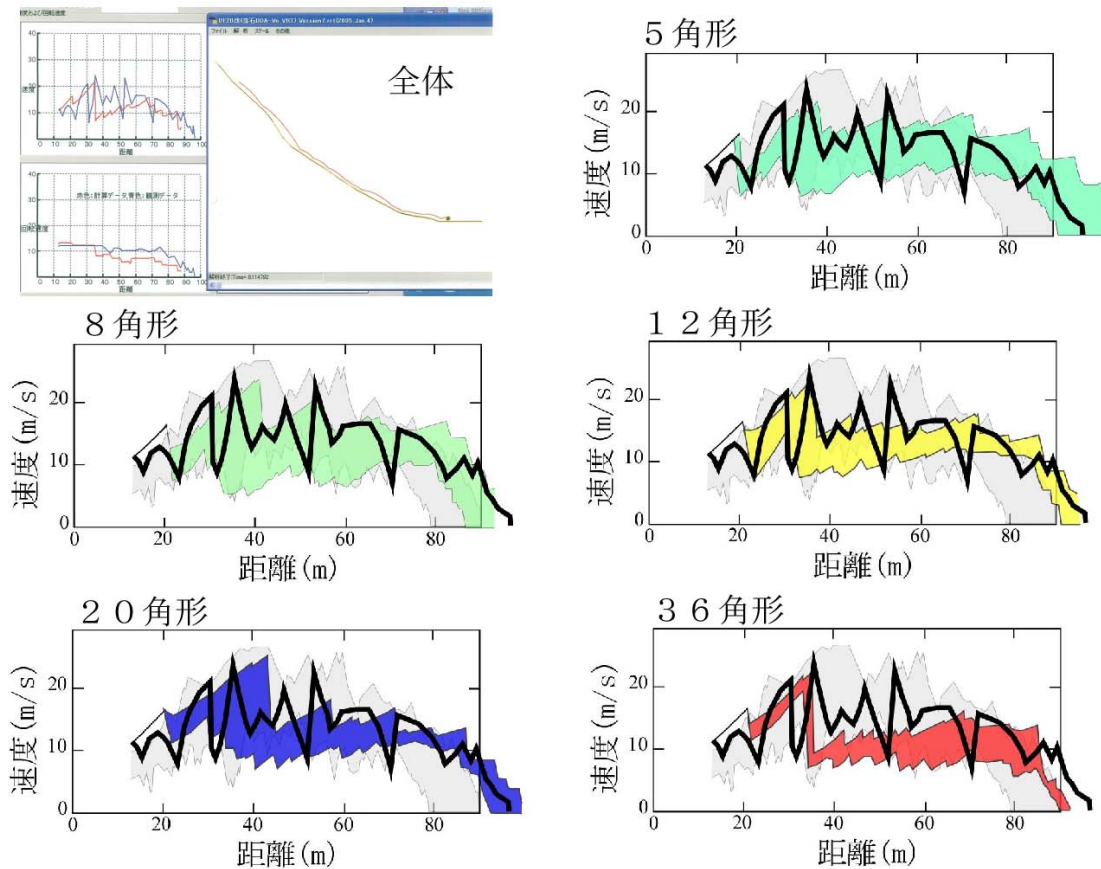


図 3.5.14 現場(c)における 5,8,12,20,36 角形 velocity 軌跡の比較

以上の実験から、

- 1) 2d-DDA では、辺一辺接触の反発の際に想定外の減衰が生じる可能性が大きい。
- 2) 5～8 角形は、回転しにくく、すべる挙動が卓越する。速度の再現性に対する影響は大きくないものの、ばらつきの範囲は広い。
- 3) 12～20 角形では、回転の影響が大きくなるが、その影響には①12 角形では滑って飛び出すケース、②20 角形では、姿勢を変えて飛び出すケース、の 2 タイプがみられる。

いずれも、想定外の速度減衰を生じるものの、4 章で述べるように実挙動としてはいずれも報告されているタイプである。②については接触毎に速度エネルギー比が正しく働いた結果であることを確認した。

- 4) 36 角形では、すべりより回転が卓越し、衝突による速度のばらつきは減少する。また、転がり始めると加速する現象がみられるようになる。この点から、36 角形になると円ないし球体に近い挙動を示すようになることがわかる。

以上の結果からみると、DDA を用いた落石解析において形状の影響を無視した解析を

行うためには 36 角形以上とすれば円に近い挙動が得られること、しかしその一方で、実際の岩塊の挙動に近いのは 12 角形～20 角形前後の多角形というのが、現段階での結論となる。

以上、解析に際して、落石を 5～36 までの多角形で表し、落下中の軌跡と速度を調べたところ、5～8 角形では回転よりもすべりが、36 角形ではすべりよりも回転が卓越する結果が得られた。落石が、円に近いと逆に実際の挙動から離れるというのは興味深い結果であるが、本研究の課題は、速度比の特性を把握することにあるため、形状の影響は極力取り除くことが望ましい。このため、落石問題における反射の問題では、以後球体による解析が可能な DDAball を用いることにする。なお、DDAball は三次元解析であり、地形データをもとに三次元解析モデルを作成する必要がある。これについては、次の 3d-DDA の適用の節で説明する。

3.5.6 3.5 のまとめ

本節では、不連続変形法(DDA)を落石問題に適用する際の問題点について述べた。

落石を多角形でモデル化する際、円に近いと回転が卓越し、角数が減じるほど滑動が卓越する挙動を示すことがわかった。ほぼ、円と見なせるのは 36 角形以上である。ただし、再現解析を行うと、12～20 角形の方が適度にばらつき、実際に近い。一方、12 角形と 20 角形を用いて、衝突時の問題を検討したところ、エネルギー減衰を設定値どおりに表現できない場合のあることがわかった。このような問題は、接触関係の処理過程、あるいは解析時のパラメータ(時間ステップ、ペナルティバネなど)の設定方法などに原因があるとみられる。

一方、本研究で行った現場実験の再現解析に DDA を適用した結果、落下途中に大きな地形変換点があり、入射角度が小さい場合には、速度エネルギー比、粘性係数のいずれを用いても再現困難であることがわかった。これは、質点解析で法線方向速度比を用いても同じである。もちろん、各反発地点で得られた速度エネルギー比を、それぞれの地点に設定すれば、再現は可能である。検討結果からは、この原因は速度エネルギー比の特性自体にあるものと考えられた。4 章で述べるが、速度エネルギー比自体の詳細な性質は、未だ不明である。

以上より、DDA による岩塊の崩落、落石シミュレーションの実用化のためには、解析時のパラメータの設定方法と、速度エネルギー比の性質とその適用方法という 2 つの問題を解決しなければならないことがわかった。

3.6 三次元岩盤崩壊モデルの作成と活用への試み

3.6.1 3d-DDA のための三次元岩盤崩壊モデルの作成法

DDA には、三次元 DDA(3d-DDA)や球状要素剛体 DDA(DDAball)といった三次元解析部のソルバーが既に準備されている。しかし、岩盤崩壊や落石問題に三次元の DDA 解析を適用するためには、複雑な地形と凹凸のある岩盤表面や地形のモデル化、さらには不連続面を配置したブロックの集合体からなる岩盤崩壊モデルを作成しなければならない。しかしながら、現段階ではこのような専用ツールがない。

一方、年々進歩するコンピュータグラフィックス(CG)の世界では、三次元 CAD/CG を用いた土木構造物のデザインや防災への啓蒙を目的とした災害予測アニメーションへの利用が既に始まっている[55]。ここでは、三次元モデル作成のための汎用ソフト(以後 CAD/CG 系ソフトと呼ぶ)を用いた、地形表面形状モデルの作成法と、これに決定論的に不連続面を配置して 3d-DDA を活用する方法について事例をもとに説明する。

<解析モデルと取得データの要素>

従来は難しかった地形情報の取得が、レーザー測量や写真測量などの機器の発達により、容易となった。これらの手法の特徴は、取得したデータの CAD/CG 系ソフトとの高い親和性にある。実際、レーザー測量や写真測量のほとんどのソフトが、汎用 CAD/CG ソフトにおける共通ファイル型式である dxf 型式で出力する機能を備えている。

一方、CAD/CG 系ソフトで作成される三次元モデルには、図 3.6.1 に示すようなワイヤーフレーム、サーフェイス、ソリッドの 3 種類のモデルがある。CAD/CG 系ソフトは、dxf ファイルや点座標を直接読み込むことで、これらのモデルを順次作成する機能を備えている。ここで、ワイヤーフレームは、輪郭を表現する線のみで構成される立体であり、サーフェイスは厚みを持たない面で構成される立体を指す。また、ソリッドは体積を有する立体である。いずれも、画面上では立体に見えるが、3d-DDA、DDAball の三次元解析モデルは、後述する三角形ポリゴンによるサーフェイスモデルで作られている。

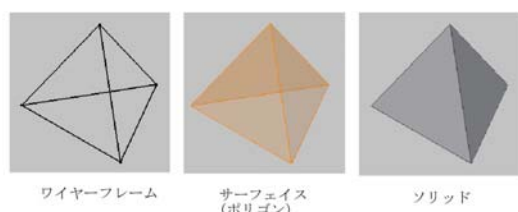


図 3.6.1 三次元モデルの種類

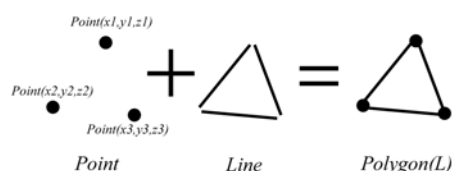


図 3.6.2 三次元モデルの構成

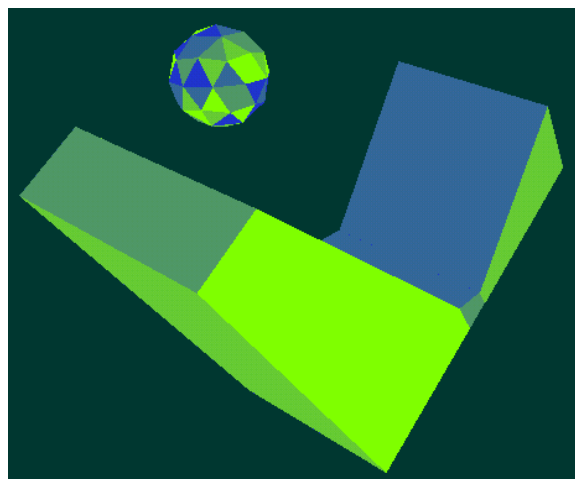
(http://www5e.biglobe.ne.jp/~es-eng/espage12_1.html)

一方, モデラーソフトで作成される X ファイルは, 図 3. 6. 2 に示すような頂点座標(point)と頂点の接続情報(line)で記述される.

```
Polygon    = Polygon(Point x1, y1, z1), Point(x2, y2, z2), Point(x3, y3, z3));
Line       = Line(Point(x1, y1, z1), Point(x2, y2, z2), Point(x3, y3, z3));
Polygon    = Polygon(Line)
```

Polygon や Line は, それぞれ頂点座標(ジオメトリ)と接続情報(トポロジ)を指す. このように記述される三角形や四角形の形状は, CAD/CG 系ソフトの世界では一般にポリゴンと呼ばれる. ただし, Line 情報は, Polygon の並びで表される.

3d-DDA のモデルデータはこのようなポリゴンで作成されるが, 1 つのブロックを複数(125 以上)のポリゴンで作成できる, 座標系が CAD と一致する(右手系), "tcdt"があるためポリゴンのジオメトリ情報のみを準備すればよい, などの特徴をっており, CAD/CG 系ソフトとの親和性が高い.



AutoCADのLogファイル
(一部余分な情報を削除後)

```
list 認識された数: 80
      で 点、X=
16.33 Y= 7.96 Z= 22.83
      で 点、X=
16.87 Y= 8.66 Z= 24.21
17.21 Y= 6.91 Z= 23.72
      で 点、X=
16.70 Y= 8.87 Z= 25.83
      で 点、X=
17.43 Y= 7.44 Z= 25.48
      で 点、X=
16.87 Y= 8.66 Z= 24.21
      で 点、X=
17.28 Y= 5.88 Z= 24.99
      で 点、X=
17.21 Y= 6.91 Z= 23.72
      で 点、X=
17.43 Y= 7.44 Z= 25.48
```



3d-DDAのtcdtファイル
の座標(x,y,z)情報

```
16.33      7.96 22.83
16.87      8.66 24.21
17.21      6.91 23.72
0.00 0.00 0.00
16.70      8.87 25.83
17.43      7.44 25.48
16.87      8.66 24.21
0.00 0.00 0.00
17.28      5.88 24.99
17.21      6.91 23.72
17.43      7.44 25.48
0.00 0.00 0.00
```

図 3. 6. 3 DDA のモデルと, CAD データと 3d-DDA(tcdt)ファイルの例

＜地形解析モデルの作成＞

レーザーや写真から得られるデータは、多くの場合点群データと呼ばれる巨大な XYZ 座標、つまり Point データの集合体からなる。これらのデータから、3d-DDA のためのブロックモデルを作成する手順を、図 3.6.4 に示す。

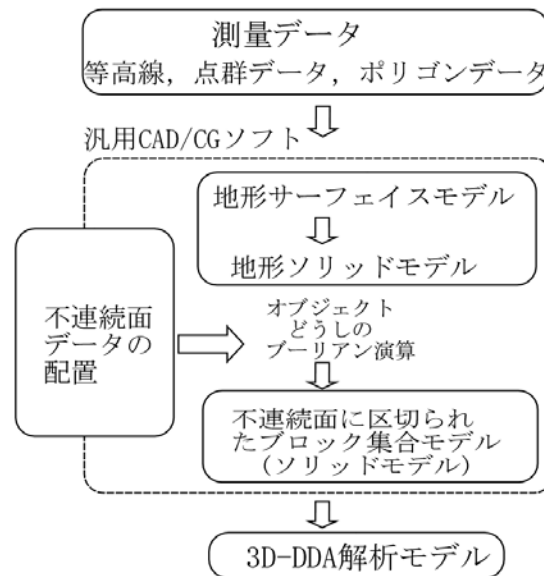


図 3.6.4 3d-DDA モデル作成のフロー

写真測量ソフトやレーザー測量などの専用 CAD ソフトの中には、巨大な点群データから直接三次元解析モデルを作成する機能を備えたものもある。しかし、そのほとんどがサーフェイスモデルまでであるため、地形モデルは作成できてもそのモデルに不連続面を配置することが難しい。また、三次元座標を得る手段があっても、常に十分な範囲と精度の地形情報が得られるとは限らない。実際、現段階では、既存の地形図にノンミラー測量を組み合わせる地形等高線図を一度作成し、これを用いて解析や設計に供することの方が圧倒的に多い。この点からみると、レーザーや写真測量から得られるデータを直接扱うことはもちろん、一度 CAD/CG 系ソフトというフィルターを通して、地形等高線データを活用する方法は、手順は複雑だが実務的あり自由度の高い方法といえる。

具体的な作成手順を図 3.6.5 に示す。本例では、地形情報を写真測量によって取得した。このデータから頂点座標データを読み込み、平面等高線を作成したのが②である。等高線モデルは、通常ワイヤーフレームと呼ばれる線情報データのみで作られている。このため、数値解析モデル用のメッシュを作成する場合、等高線間に位置する頂点を補間することができない。したがって、補間が可能なサーフェイスモデルに変換する必要がある。一方、

3d-DDA で用いる不連続面に区切られたブロックの頂点座標情報を、CAD/CG 系ソフトで作成するためには、配置された不連続面により囲まれた立体ブロックの集合体を認識しなければならない。このために、サーフェイスモデルを用いてソリッドモデルに変換する。これが③の状態である。ただし、三次元解析は、今でも多大な計算時間を要する。したがって、モデル表面を被う三角形ポリゴンの大きさは、岩塊の特徴を損なわない程度に粗くしておく方が良い。③の着色部分がソリッドモデルから、解析モデルとして切り抜いた部分であり、ポリゴン(三角形メッシュ)は 5m 間隔で作成した。④は、崩落岩塊の測量結果をもとに、復元した解析モデルであり、この後、不連続面を配置して完成する。

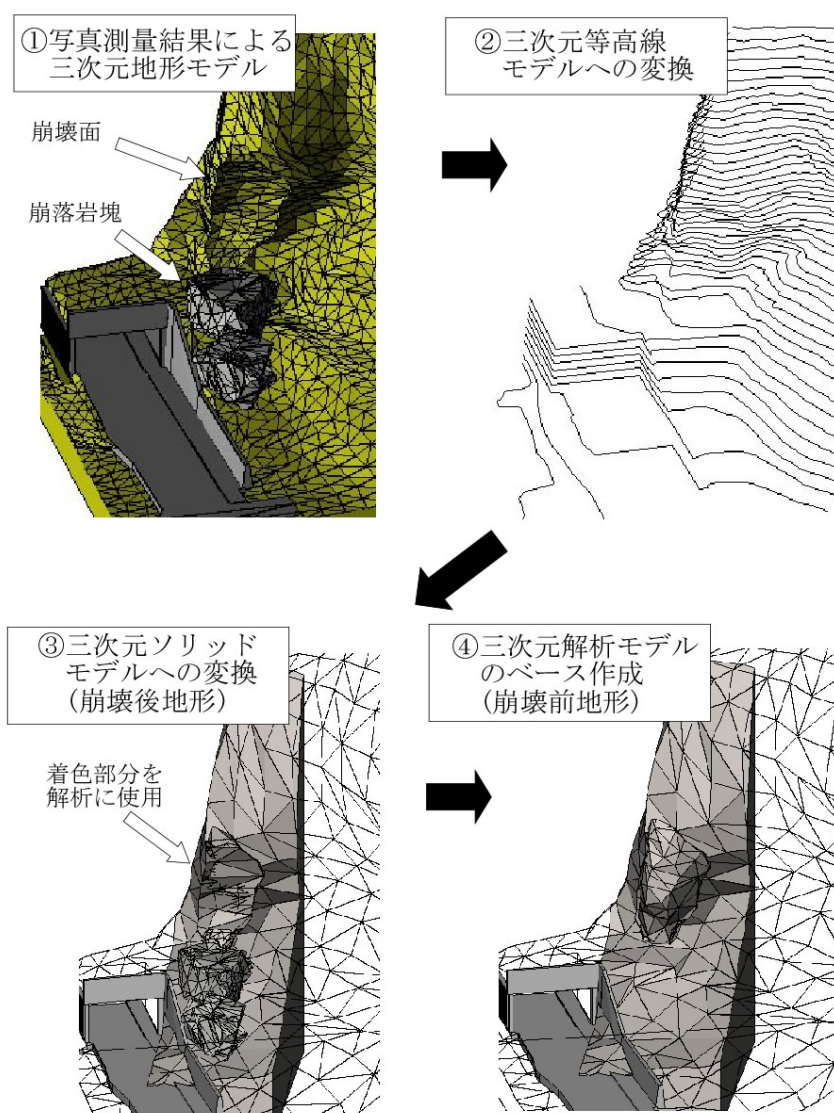


図 3.6.5 CDA データから DDA モデル作成までの手順

<不連続面の配置>

不連続面をモデル内部に配置し、その情報を取り出すためには、集合演算(あるいは論理演算)と呼ばれる固体間の差し引き計算を行い、その結果を個々のブロックとして認識する必要がある。このため、サーフェイスで作成したモデルを、ソリッドモデルに変換する。

図 3.6.6 は、岩塊ブロックに不連続面を配置した図である。図中に示した不連続面の配置ポイントは、現地での計測位置であり、これが、不連続面を決定論的に扱う際に「位置」が必要になる所以である。

カットしたブロックが完成したら、今度はそれらの情報を出力する。この出力事例が図 3.6.3 である。CAD/CG モデラーソフトのほとんどが、所定のブロックの三角形要素のジオメトリとトポロジ情報を、順番に出力できる機能を持っている。この機能を用いて出力したデータから、不必要な情報を削除すると、各ブロックを構成する三角形要素のジオメトリとトポロジ情報になる。

<3d-DDA の解析モデル>

3DDA は、以下の 3 つのソフトで構成される。

- tc.exe 入力データから解析ブロックを形成する部分。
- td.exe 解析計算部
- tg.exe 解析結果の表示部

3d-DDA の特徴は、ブロックを多数の三角形で表現でき、しかも入力データには、構成する三角形要素の番号がなく、ジオメトリとトポロジ情報だけで構成されるという点である。この特徴を利用すると、CAD/CG ソフトから読み込んだデータから三次元モデルを作成することができる。

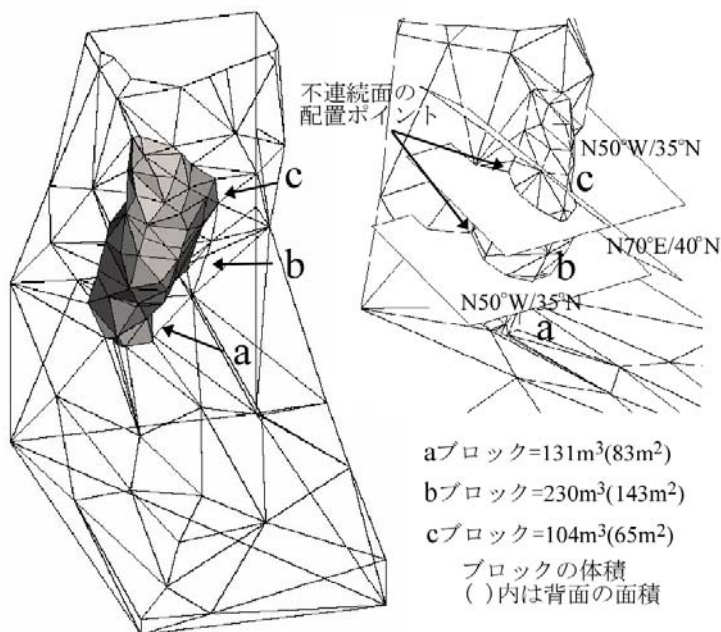


図 3.6.6 完成した 3d-DDA 解析モデル

3.6.2 岩盤崩壊へ 3d-DDA の適用事例

二次元解析の結果からは、①a 岩塊脚部前面の鉤型割れ目をモデル化しなければ転倒を再現できないこと、②a-b 間割れ目面と b-c 間割れ目が、解析断面上で平行でなければ一体となった転倒が生じないことなどが明らかとなっている[39].

ただし、倒壊方向が a-b 割れ目の最大傾斜方向より山側にずれていることや、倒壊した c ブロックが山側におちた理由などは二次元では説明困難である。この問題を解決するために、三次元 DDA(3D-DDA)による解析を行った[58].

(1) 物性決定のための予備解析

作成した本崩壊の復元モデルをもとに、鉤型割れ目と倒壊方向に関する三次元解析を行った。なお、3-d-DDA では落下、衝突時のエネルギー評価のためのパラメータが準備されていない。そこで、ここでは反発状態と垂直剛性バネとの関係をもとめ、その結果をもとに垂直合成バネを決定する方法をとった。

図 3.6.7 は、試験に用いた 8 面体である。体積は 160m³ で、落下した 3 つの岩塊のほぼ平均の大きさである。図中左の小さな直方体は、上が 5m、下が 2m であり落下高さ読みとりのためのスケールである。試験ではこの岩塊を、下の反射板に 10m/s の速度で衝突させ、跳ね返る高さと、離脱後の時間刻みから速度を求め、その時のペナルティバネと比較した。試験結果を図 3.6.8 に示す。試験では、時間刻みと許容変位比(DAR)に同じ値を用いた。値は、0.002 と 0.01 の 2 ケースである。DDA の時間刻みと DAR は、経験的に大きい値を採用する方が大きく跳ねる傾向が強い。また、ペナルティバネは大きいほど反発する傾向が強いといわれるが本結果では逆で、値が大きいほど減衰が大きい。ただし、

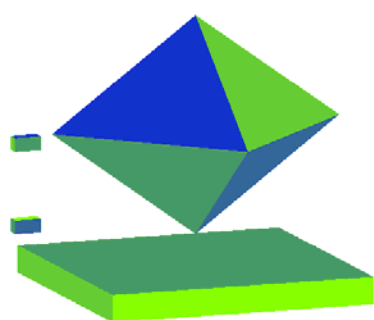


図 3.6.7 一次元バネモデルとして使用した解析モデル

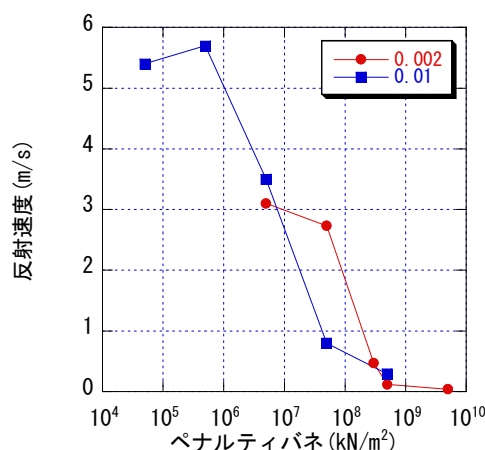


図 3.6.8 一次元モデルにおける反射速度とペナルティバネの関係

Δt , DAR が $5 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 以上になると、今度は接触時に反射板が大きく変形する現象がみられた。また、本試験では、完全弾性反発($E_v=1.0$)は再現できず、 $\Delta t=0.01$ のときの $E_v=0.3$ が最大であった。ただし、本崩壊は 3.5 で述べたように、落下衝突後ほとんど反発していない。このため、反射速度がほぼゼロとなる付近のペナルティバネを採用すればよい。本試験結果をもとに、入力物性を以下のように設定した。 $\Delta t=0.002$ としたのは、その方が落下物の変形が小さく、安定して見えるためである。

密度	26kN
時間刻み	0.002
許容変位比	0.002
ペナルティバネ	$2 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$

(2) 解析結果とその評価

(a) 鉤型割れ目の影響

解析モデル作成時には、どこまで形状を細かく再現するかという点が常に問題となる。本解析では、二次元解析同様、当初は鉤型割れ目を無視していたが、この部位を無視すると、 ϕ を 40° としても岩体全体の滑りだしが先行するため転倒が遅れ、逆に、鉤型割れ目を考慮すると ϕ が 20° でも全体が一体となった転倒が先行する(図 3.6.9)。二次元解析とやや異なるのは、滑りだしによって転倒のタイミングがずれると、二次元では上部岩塊の落下地点のみに影響するのに対し、三次元では落下地点だけでなく岩塊の落下方向にも影響するという点である。本崩壊において、鉤型割れ目は崩壊形態にも影響を与えるモデルであることがわかる。

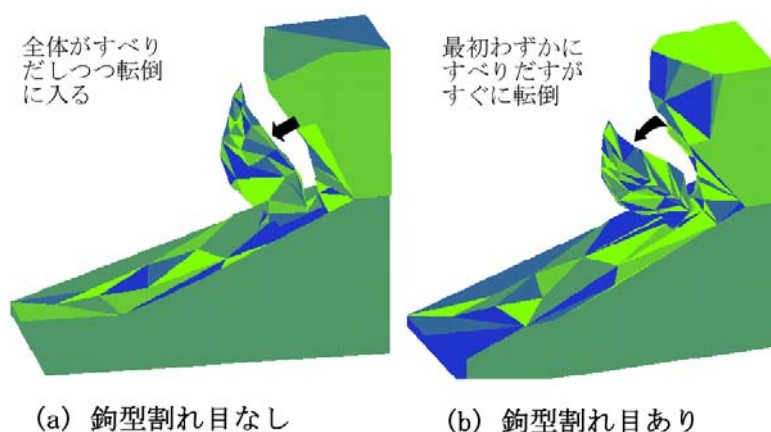


図 3.6.9 鉤型割れ目の有無の影響

(b) c 岩塊を固定した場合の a, b 岩塊の挙動に対する不連続面の影響

不連続面の倒壊方向への影響を調べるために、c ブロックを固定して調べた。この状態

は、崩壊発生直前の状態を想定したものである。解析条件は、上側の b-c 間割れ目を $N50^{\circ} W/35^{\circ} N$ と $N70^{\circ} E/40^{\circ} N$ とした場合の 2 ケースで、下側の a-b 間割れ目は $N40^{\circ} W/35^{\circ} N$ とした。c 岩塊を固定し、a-b 間割れ目と b-c 間割れ目をともに $N50^{\circ} W/35^{\circ} N$ 方向とすると、b 岩塊はすぐに動き出す(図 3.6.10(b))。

一方、b-c 間割れ目を $N70^{\circ} E/40^{\circ} N$ にすると $N17^{\circ} E$ 方向に向かって動き出す。この $N17^{\circ} E$ 方向は、a-b 間割れ目と b-c 間割れ目のみかけの傾斜がほぼ平行になる方向であり、b 岩塊の山側への動きを規制する方向でもある。ただし、その方向は設定する摩擦角によって $N15^{\circ} E$ 方向から $N35^{\circ} E$ 方向の間で変化する。すなわち、 $\phi=0^{\circ}$ とすると不連続面の最大傾斜方向($N35^{\circ} E$ 方向)へ、 ϕ を高くするほど b ブロックの重心方向に回転するように偏芯しながら動く。 $N17^{\circ} E$ 方向になるのは ϕ を 35° 以上とした時である(図 3.6.10(c))。

これらの結果から、b-c 間割れ目は、b 岩塊の重心方向とその最大傾斜方向の間で、摩擦によって動きの方向を決定する役割を持っていたこと、また a-b 岩塊割れ目は $N70^{\circ} E/40^{\circ} N$ の時、b 岩塊の動きを道路側へと規制する役割を持っていたことなどがわかる。

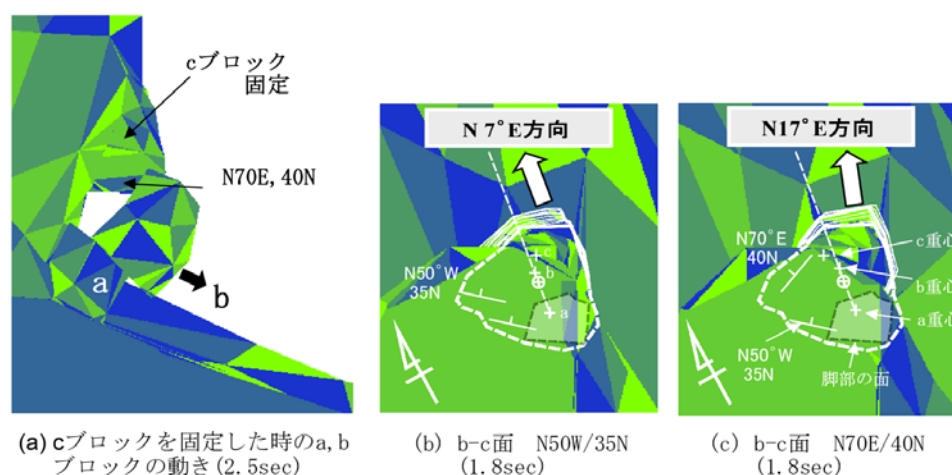


図 3.6.10 b-c ブロック間の不連続面の方向と摩擦による転倒方向の違い。

(c) a-b ブロック間の流れ盤の影響

a-b 間の不連続面($N50W, 35N$)は、現地で最も目立つため、当初は流れ盤として崩壊の方向に影響を与えたものと考えた。しかし、その場合の倒壊方向は、実際の方向($N25E$)よりも道路側のコースをとることになる。そこで、ここでは bc ブロックを一つのブロックと見なし、これが一気に崩壊した場合を想定して、a 及び bc ブロックの落下方向と転倒タイミングへの影響を、摩擦を変えて調べた。この状態は、ほぼ崩壊発生直後の状態に相当する。

図 3.6.11(a)は、 ϕ を 40° とした時の転倒途中の状態を示したものである。全体を一つのブロックとした時との違いは、まず bc ブロックが先に滑り出し、それから a ブロック

を含む全体が転倒を開始するという点である。この時、底面のかぎ型割れ目が無いと、滑り出しが大きいため転倒が遅れるのは、(a)での検討結果と同じである。

図 3.6.11 (b) (c) は、この時の bc ブロックの滑り出し方向を、 $\phi=10^\circ$ と 40° の場合で比較したものである。図中では、bc ブロックが a ブロックから完全に分離して飛び出す直前までのブロックの動きを約 0.2sec 単位の外枠線の動きで表した。なお、図中の点線は a 及び bc ブロックの重心点を結んだ方向を示す。また、この重心の方向と a-b 不連続面の最大傾斜方向との開きは $23\sim 25^\circ$ であり、経験的な流れ盤の影響範囲($\pm 30^\circ$)にある。

図 3.6.11 (b) は、 ϕ を 10° とした時のもので、この時 bc ブロックは、重心より 10° 程偏芯するもののほぼ流れ盤方向に滑る。一方、図 3.6.11 (c) は、 ϕ を 40° とした時で、bc ブロックは重心方向に回転しながら動き出す。飛び出す直前の回転角は約 22° である。倒壊方向は、いずれの場合も bc ブロックが a ブロックから離れた時に決まる。実際の倒壊方向は N25E 方向であるため、a-b 不連続面の摩擦角を $\phi=10^\circ$ とするなら道路擁壁をほぼ直撃することになる。 $\phi=35\sim 40^\circ$ ではやや山側よりとなるが、道路擁壁への影響という点からみれば、これに近い摩擦抵抗のなかで滑ったものとみられる。本結果から、滑りや転倒を伴う崩壊の初期には、ブロックの重心と摩擦が大きく影響することがわかる。

なお、a ブロックは、 ϕ が 25° 以下だと bc ブロックがそのまま滑って落下するため転倒しない。しかし、 25° 以上では a ブロックも転倒するようになり、 35° 以上になると、bc ブロックの動きに追随するように転倒するようになる。

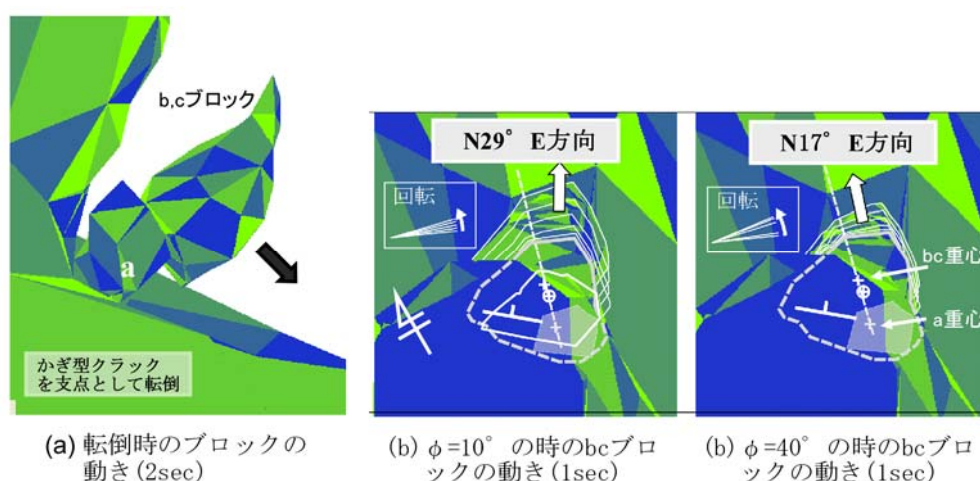


図 3.6.11 a-b ブロック間の流れ盤が倒壊方向に与えた影響

(3) 崩壊全体のシミュレーション

以上の検討結果をもとに、崩壊の全容をシミュレートした結果が図 3.6.12 である。シミュレーション開始と同時に、b、および c ブロックが滑るように動き出す。b-c 岩塊間のせん断跡はこの時についたものと考えられる。b 岩塊は、最初は流れ盤方向である N25° ～ 30° E 方向に飛び出すが、すぐに b 岩塊の重心方向である山側へと偏芯していく。

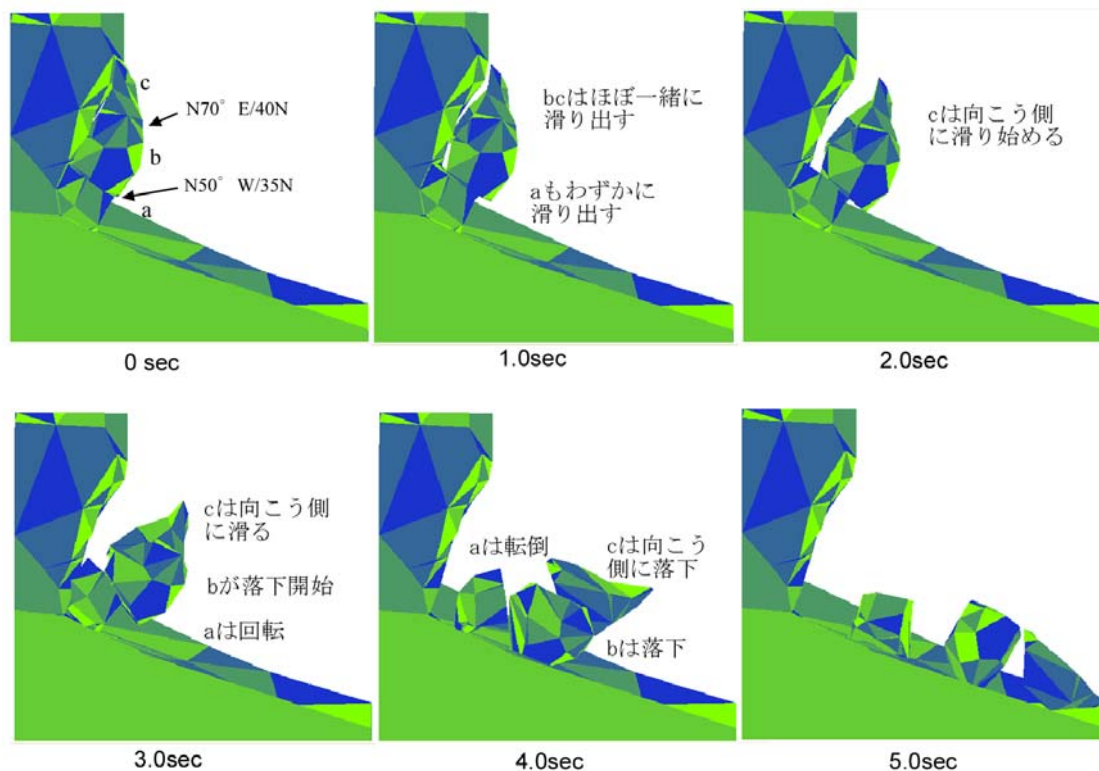


図 3.6.12 3d-DDA による崩壊の再現解析

一方、c 岩塊は、最初は b 岩塊と一体で動くが、すぐに $N70^{\circ} E/40^{\circ} N$ の最大傾斜方向である山側へと落下し始める。このようにして、b 岩塊と c 岩塊が b-c 間の割れ目面上を 1m あまり滑り出したところで、今度は a 岩塊を引っかけるようにして全体の回転が始まる。この時の倒壊方向は $N17^{\circ} \sim 20^{\circ} E$ 方向である。a 岩塊脚部の鍵型割れ目は、この転倒過程で生じたものと考えられる。

落下方向は、観察される岩塊の並びの方向($N25^{\circ} E$)よりやや山側であり、落下地点で衝撃のほとんどが吸収され、最後にわずかに姿勢を変えることで観察される位置で停止したものと想定される。

以上の解析結果から、崩壊の原因は大きなオーバーハングを形成する b 岩塊と背後の割れ目の上への伸展であり、崩壊方向を決定したのは山側に大きく傾く b 岩塊と a-b 間割れ目の存在であったことが判明した。

以上のように、三次元解析法を用いると、二次元では難しい崩壊方向に関する考察が可能となること、しかしその結果は、不連続面とブロックの形状と設定する摩擦各に大きく影響を受ける。モデル化という壁は大きいですが、岩盤崩壊のメカニズムを知り、適切な影響予測を行ううえで、3D-DDA はきわめて有効な解析手法といえる。

3.7 3章のまとめ

本章では，最初に，岩盤崩壊現象に用いられる数値解析手法を概観し，崩落予測解析に用いられる質点解析法と，近年注目されている不連続体解析法とを比較し，3.2において不連続体解析法の一つ，不連続変形法(DDA)の基礎理論について，その詳細を説明した．また，3.3では，その適用に当たって必要となる物性値の取得法，崩壊後の岩塊のエネルギー損失を評価するための入力値(速度比，速度エネルギー比，粘性係数)について説明した．一方，3.4では，岩盤崩落問題への適用性という観点から，適用事例を中心に，集合体ブロックおよび単独ブロックへの適用例を概観し，3.5では，問題を落石問題に絞り，DDAを適用する際の入力値の設定やモデル作成時の，現段階で野問題点を整理した．

3.5.1)落石シミュレーション(質点解析法と不連続体解析法)

落下中の岩塊の運動は，飛行，衝突，回転，滑動に区分される．質点解析は，これらの運動別に立てた解析式を境界条件に応じて解く方法で，研究・開発年代も旧く，これまでも多くの経験が蓄積されている．一方，不連続体解析法は，前記の運動を包括する運動方程式を細かい時間刻みで解く方法であり，複雑な岩盤挙動のメカニズムを明らかにする方法として期待されている．しかし，現段階では質点，不連続体解析法ともに，多くの問題点を抱えている．

表 3.7.1 質点解析法と不連続体解析法の違い

	質点解析	不連続体解析法(DDA)
手法の特徴	飛行，衝突，回転，滑動別に方程式をたてる．境界条件が必要	飛行，衝突，回転，滑動を含む運動方程式を，細かい時間刻みで解く．
モデル	球，円	任意の多角形 球体，および球の集合体
物性値	法線方向速度比(R_n) 接線方向速度比(R_t) 転がり摩擦係数	質量，弾性係数 速度エネルギー比(E_v)，速度比(R_v) 時間刻み，ペナルティバネ

- 1) 落下経路の途中に大きな地形変換点がある場合の解析では，粘性係数，速度エネルギー比，法線方向速度比のいずれを用いても，速度と軌跡の変化を再現することが難しい．
- 2) 落下岩塊を多角形で表すと，接触反発時に二重に減衰することがある．
- 3) 落下岩塊の角数を 5～36 まで変化させると，角数が大きいほど軌跡，速度のばらつきが小さくなり，36 角形でほぼ円としての挙動に近づく．

1)は，速度比の性質そのものの問題であり，解析手法の問題ではない．このため，質点解析を用いる場合にも注意が必要な点である．一方，DDA で用いる速度エネルギー比(プ

プログラム内部では速度比)は、質点解析で常用される反発係数以上に、その性質は知られていない。一方、2)、3)は、不連続変形法の解析時の基本設定と、そのモデル化に関する問題である。不連続体解析法の特徴は、岩塊を正確にモデル化できる点にあるとされ、形状によって生じる反発時のばらつきは、落下時の不確実性を表す有力な方法の一つとも考えられている。しかし、2)のような現象があると、1)で述べた速度比の正しい性質を調べるうえでは障害ともなりかねない。このため、本研究では以後、落石に球要素を用いることとした。

以上より、DDA を落石シミュレーションに適用するためには、まず使用する速度比(R_v)など衝突時の性質を正確に把握すること、適切な解析を実行するためにも解析内部のパラメータの設定方法を確立することが重要となることがわかる。本研究では、次の4章で前者の問題を、またその次の5章で後者の問題を扱うこととした。モデル形状の影響は、この2点が解決した後でも十分と考える。これらの点をまとめて、本研究の後の検討方針を、図 3.7.1 図に示した。

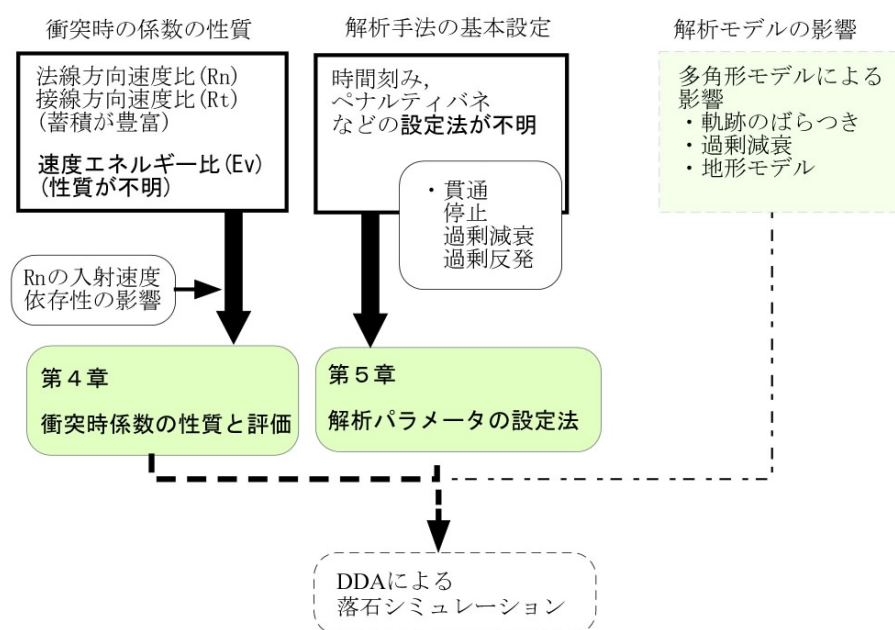


図 3.7.1 本章での結果と以後の課題

なお、最後に 3.4 では、三次元 DDA によるモデルの作成と解析事例について概説した。本来、岩盤崩落も落石も三次元の問題であり、そのモデル作成法も重要な課題の一つである。本研究では、汎用 CAD/CG 系の市販垂不利ケーションソフトを用いて三次元モデルを作成する方法を述べた。この方法は、後述する三次元落石シミュレーションである DDAball にも適用される。

第3章 参考文献

- [1]土木学会：岩盤斜面の調査と対策，1999
- [2]土木学会：岩盤崩壊の考え方・現状と将来展望-[実務者の手引き](CD-ROM版)，2004
- [3]龍明治：標準的キーブロック解析システムの解説と配布，例題演習，不連続性岩盤解析
実用化研究会，Vol.8，(社)システム総合研究所.
- [4]柄本泰浩，大西有三，陳光斉：不連続性岩盤の調査・解析と評価，4.不連続性岩盤にお
ける調査・解析事例(応力変形問題)(その7)，土と基礎，Vol.48,No10,pp.41-46,2000.
- [5]石井孝典，山田結城，川北稔，蔣宇静：流れ目亀裂を挟在する岩体の安定性検討，第
34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp237-pp242，2005.
- [6]平野勇，松岡俊文，山田泰広，石川慶彦：新第三紀火山岩砕屑岩におけるキャップロッ
ク型スラビング崩壊に関する検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，
pp231-pp236，2005.
- [7]秋山泰裕，伊藤和伯，宮下尚志，川北稔，岸徳光：不安定化が懸念される岩体の3次元
FEMを用いた安定性検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，
pp249-pp254，2005.
- [8]地盤工学会：不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書，(社)地盤工学会，岩の力学委
員会,1995.
- [9]佐々木猛：岩盤掘削に伴う岩盤挙動の予測と評価に関する技術の現状と課題，4.岩盤
解析の現状と課題，岩盤システム工学セミナー，pp.57-86,Vol.13,(社)システム総合研
究所，1996.
- [10]門間敬一，千田容嗣，馬貴臣，進士正人，大西有三：岩盤崩壊メカニズムを評価する
ための不連続変形法の適用に関する研究，第15回不連続性岩盤解析実用化研究会，
(社)システム総合研究所，pp.1-11,2002.
- [11]Keiichi Monma,Jian-Hong Wu, Yuzo Ohnishi , Satishi Nishiyama : The
tree-dimensional discontinuous deformation analysis(3D DDA) and its application
to rock toppling urnal of the japan landslide society, Vol.39,No.1, pp.48-52, 2002.
- [12]松本司，山口薫，倉岡千郎，藤原一啓，小野慎吾：急崖斜面における大岩塊の落下機
構の調査と数値解析，地すべり，Vol.40, No.6, 2004.
- [13]西村強，木山英郎，谷口洋二：3次元落石運動における入力値の設定法に関する考察，
第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.97-102, 2006.
- [14]細谷昭悟，岩間倫秀，中根昌士，伊藤大輔，氏平増之：落石の三次元数値シミュレー
ションに関する研究—数値解析の方法と直線型斜面へ適用した場合—，応用地質，
Vol44, No.1, pp.25-35, 2003.
- [15]細谷昭悟，中根昌士，松本直樹，氏平増之，樋口澄志：落石の三次元数値シミュレー
ションに関する研究(続報)—凹凸のある採石場の斜面へ適用した場合—，応用地質，
Vol45, No.1, pp.2-12, 2004.

- [16]細谷昭悟, 氏平増之, 宮下尚志, 池田泰之, 鈴木伸二: 三次元落石シミュレーションの適用性に関する検討ー北海道日方泊覆道における落石の場合ー, 応用地質, Vol47, No.2, pp.98-109, 2006.
- [17](社)日本道路協会: 落石対策便覧に関する参考資料ー落石シミュレーション手法の調査研究資料ー, 丸善, 2002.
- [18]Shi G. & R.Goodman : Discontinuous Deformation Analysis. Proc. 25th U.S. Symp. On Rock Mech. Evanston , AIME, pp.269-277, 1984.
- [19]不連続変形法(DDA): 計算力学レクチャーシリーズ 6, 丸善株式会社, 2005.
- [20]Y.Ohnishi, S. Nishiyama : Recent insights of analyses using discontinuous methods in rock engineering in Japan, Proceedings of ICADD-8, Beijing, 2007.
- [21]E.Hoek : Strength of Rock and Masss. ISRM News Journal, Vol.2, No.2, 1996.
- [22]岡部幸彦, 進士正人, 呉旭, 川本眺万: RMR による岩盤の変形係数の推定, 土木学会論文集, No.652, III-51, pp.283-286, 2000.
- [23]日本道路公団: 設計要領第二集(橋梁, 擁壁, カルバート)
- [24]櫻井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎: トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集, No.493, III-27, pp.185-188, 1994.
- [25]島内哲哉, 中井卓巳: 不連続性岩盤の調査・解析と評価, 3.不連続面の調査と評価(その 2), 土と基礎, Vol.48, No.1, pp.55-60, 2000.
- [26]吉中龍之進, 小野寺透: 岩盤分離面の表面形状とせん断強さとの関連, 土と基礎, Vol.24, No.1, pp.7-12, 1976.
- [27]Barton, N. and Bandis, S : Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. 23rd U.S. sympo. on rock mechanics, Berkeley, pp.739-760, 1982.
- [28]Barton, N. and Choubey, V : The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1-54, 1977.
- [29]グッドマン, R.E. (赤井浩一・川本眺万・大西有三訳): 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978.
- [30]Steevens, Warren D., RocFall: A Tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, University of Toronto,
- [31]右城猛, 吉田博, 矢野光明, 高石協, 八木則男: 斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する 考察, 土木学会論文集, No.581/VI-37, pp.49-58, 1997, 12
- [32]Masto Shinji, Hiroyuki Ohno, Yasunori Otsuka, Guichen Ma : Viscosity coefficient of the rockfall simulation, Proceedings of ICADD-2, 1997.
- [33]大津宏康, 大西有三, 伊東利和, 竹山雄一郎, 西山哲: 不連続面の空間分布特性に着目した斜面崩壊に伴う社会的損失推定, 土木学会論文集 No.736/III-63, pp.231-248, 2003.
- [34]濱崎英作, 佐々木明彦: DDA による地滑り解析事例, 第 18 回不連続性岩盤解析実用

化研究会資料, September, 2003.

- [35]佐々木猛, 萩原育夫, 佐々木勝司, 吉中龍之進, 大西有三, 西山哲: 不連続変形法による斜面崩落モデルの地震応答解析, 第9回計算工学講演会論文集, pp.201-204, 2004.
- [36]萩原育夫, 佐々木猛, 佐々木勝司, 西山哲, 大西有三: 不連続変形法による地震時斜面崩壊解析, 第40回地盤工学研究発表会, oo.2299-2300, 2005.
- [37]黒岡浩平, 家島大輔, 岩田直樹: 不連続変形法による長大斜面の地震時安定性に関するシミュレーション, 第27回不連続性岩盤解析実用化研究会資料, jun, 2006.
- [38]石川達也, 三浦清一, 横浜勝司, 川村志麻: 火山灰地盤の斜面崩壊挙動に対する不連続体解析法の検討, 土木学会第62回年次学術講演会, pp27-28, 2007.
- [39]清水順二, 島内哲哉: 北浜岩盤・転倒崩壊の発生機構に関する考察, 平成17年度, 日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会合同発表会, 2005.
- [40]中島巖, 根岸正充: 層雲峡熔結凝灰岩における長柱岩体のトップリング機構ー寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究(第2報)ー, 応用地質, Vol35, No.1, pp1-pp11, 1994.
- [41]Guangq Chen & Yuzo Ohnishi: Slope stability analysis using discontinuous analysis method, Proceedings of the 37th U.S.Rock mechanics symposium, Vol.1, 1999, 6.
- [42]佐々木勝司, 佐々木猛, 萩原育夫, 吉中龍之進: 不連続変形法を用いた落石シミュレーションの基礎的研究, 第8回計算工学会, 講演論文集, Vol.7, 2002.
- [43]江良隆一, 助田勅史, 畑中義人: DDAによる落石対策工の検討, 第29回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp.291-295, 1999.
- [44]馬貴臣, 進士正人: 岩盤斜面における落石シミュレーションの適用性に関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会, pp.820-821, 1998.
- [45]立花規弘, 村本将司: 落石対策工設計におけるDDA解析の適用例, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2511-2512, 2001.
- [46]伊計秀明, 氷川勝久, 菊池淳一: モンテカルロシミュレーションを適用したDDA落石解析, 第39回地盤工学研究発表会, pp.2173-2174, 2004.
- [47]Hagiwara & T.sasaki: Estimation and simulation of vegetation effect on rockfall using discontinuous deformation analysis, Proceedings of the ISRM international 3rd ARMS, pp.1249-1252, 2004.
- [48]呉建宏, 大西有三, 大津宏康, 西山哲: 剛体回転に関する不連続変形法(DDA)の研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp.191-198, 2002.
- [49]T.Fukawa, Y.Ohnishi, S.Nishiyama, M.Yang: The application of 3-dimentional DDA with spherical rigid block to rockfall simulation, Proceedings of the ISRM international 3rd ARMS, pp.1243-1248, 2004.
- [50]萩原育夫, 三木茂, 佐々木猛, 西山哲, 大西有三: 不連続変形法による3次元落石解

- 析事例，計算工学講演論文集，Vol.9, pp.217-218, 2004.
- [51] 星川光広，今博克，溝上雅宏，三上芳正，小板橋重一，島内哲哉，納谷宏：急崖斜面における不安定岩塊の定性・定量的評価例，平成 16 年度，日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会合同発表会，2004.
- [52] 島内哲哉，酒井直樹，大西有三，西山哲：衝突角度を考慮した不連続体解析法による岩盤切土時の安全性評価，計算工学会講演論文集，Vol.9,2004.
- [53] T.Shimauchi, N.Sakai, Y.Ohnishi and S.Nishiyama : Safty assessment of rock slope by discontinuos analyses considering impact angle, Proc of the ISRM international Symposium 3rd RMS, pp1239-1242, 2004.
- [54] 島内哲哉，酒井直樹，大西有三：衝突角度の違いが落石解析結果に与える影響，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp337-342, 2004.
- [55] 栗原恒弥，安生健一：3DCG アニメーション，技術評論社，2003.
- [56] 呉建宏，大西有三，門間敬一，西山哲：3次元不連続変形法(3D DDA)による岩盤斜面崩落のシミュレーション，材料，Vol.52, No.5, pp.488-493, 2003.
- [57] 門間敬一，大西有三，大津宏泰，呉建宏，小野田敏，落合達也，荒井健一，西山哲：岩盤斜面の転倒破壊の実挙動と 3次元 DDA 解析の適用例，The 11th Japan National Symposium for Rock Mechanics ,pp 2002.
- [58] 島内哲哉，清水順二，中村公一，大西有三，西山哲：3D-DDA による北浜岩盤・転倒崩壊機構の検討，第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.79-82, 2006.

第4章 落石解析に用いる速度比の評価のための実験

前章では、数値解析適用のための入力物性とモデル化の方法、および二次元、三次元の解析事例をまとめたが、なかでも崩落・落石シミュレーションでは、速度比の性質そのものが解析結果に大きく影響している可能性を指摘した。落石問題は、これまで岩塊の落下速度やエネルギーを、斜面の滑動現象に置き換えて推定する「落石対策便覧の方法」が中心であった。しかし、落下経路が長く複雑な場合や、経験を越えた規模の大きな岩塊の落下による事故などが相次ぎ、近年ではシミュレーションが用いられる機会も増えている。したがって、シミュレーションに用いる速度比の性質を明らかにすることは、その信頼性の問題からも重要である。

本章では、まず、これまでの落石シミュレーションや落石研究の現状をまとめるとともに、DDA で用いられる速度エネルギー比の特性を調べる目的で行った、室内および現場実験の結果をもとに、速度比の特性と DDA への導入方法について述べる。

4.1 既往実験にみるこれまでの落石の研究

4.1.1 落石の運動区分と用語の定義

斜面を落下する落石の運動は複雑であり、しばしば定義上の問題も発生する。ここでは、本論に入る前に、運動の特徴や読み取り上の用語について簡単に説明しておく。

落石の運動は、落石対策便覧によれば、図 4.1.1 のように区分されている[1]。

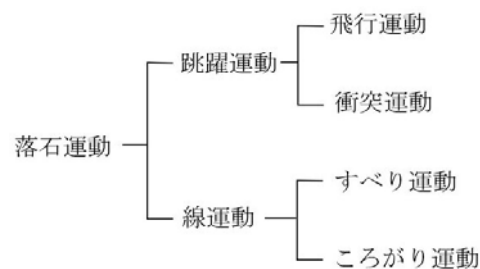


図 4.1.1 落石運動の種類

ここで、各運動は以下のように定義される。

跳躍運動・・・岩塊が斜面に衝突した後、反発して空中を飛行する運動形態。跳躍運動には、飛行運動と衝突運動が含まれる。

飛行運動・・・岩塊が斜面に衝突した後、あるいは斜面からの飛び出しにより空中を飛行する運動形態。

衝突運動・・・岩塊が飛行運動後斜面にぶつかって跳ね返る過程。

線運動・・・岩塊が斜面とほぼ接触を保ちつつ落下する運動形態。線運動には、すべり運動と転がり運動が含まれ、両者が同時に生じることもある。

すべり運動・・・岩塊が斜面と接触を保ちつつ、すべりながら落下する運動形態。

ころがり運動・岩塊が斜面を転がりながら落下する運動形態を指す。ただし、厳密な意味での回転(すべりを伴わない転がり)は、平坦地を除けば斜面ではほとんどみられず、低空の跳躍運動の連続を転がり運動と称することが多い。

落石現象において、運動の中心をなすのは衝突運動である。図 4.1.2 は、質点解析, DDA で用いられる速度比の種類である。ここで、 R_n は法線方向速度比, R_t を接線方向速度比と呼ぶ。また、 Ev を速度エネルギー比と呼ぶ。ただし、速度エネルギー比自体は計測できる値ではないので、通常は衝突前後における速度の 2 乗比, ないしに速度比で表す。速度エネルギー比は、回転が生じないように物体を水平面に自由落下させた場合の反発係数の 2 乗を指す。

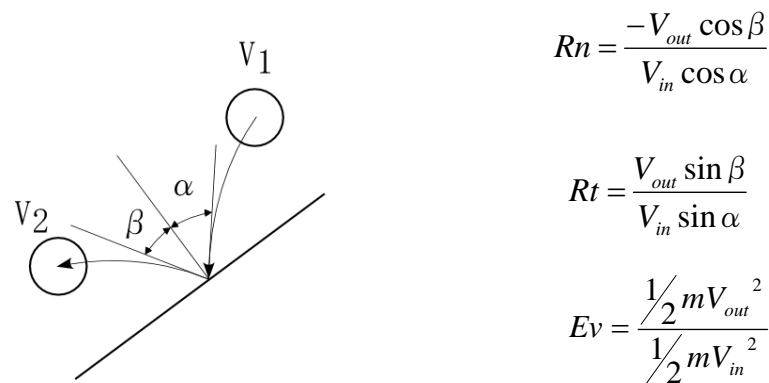


図 4.1.2 落石解析に用いられる速度比の種類

なお、後述する数値シミュレーションでは、衝突時のエネルギー損失に剛性比例型減衰係数、また落下中の運動の全体にかかる質量比例型減衰係数という用語がもちいられることがある。剛性比例型減衰係数は、DEM のダッシュポット部や DDA の速度エネルギー比が該当し、斜面法線方向と接線方向の 2 種類がある。質量比例型減衰係数は、落石が斜面を落下するとき、落石の絶対速度に比例した抵抗力を与えるための係数である。斜面や樹木に衝突するときの他、空気抵抗によるエネルギー損失として用いられ、DDA では単に粘性係数と呼ばれる。方、落石の軌跡を論じる際には、しばしば跳躍高さという用語が用いられる。落石の跳躍高さは、図 4.1.3(a)に示す落石重心で定義される。しかし、三次元空間を回転しながら飛行する落石の重心を計測するのは容易なことではなく、斜面内の突起や転石への衝突などによっても変化する。特に、しばしば問題となる対策工付近では、図 4.1.3(b)のように落石の運動とは関係なく斜面勾配に規定されるので、注意が必要であ

る。また、落石重心でみるため、落石径が 4m 近くなると、それだけで跳躍高さは 2m を越える点にも注意が必要である。

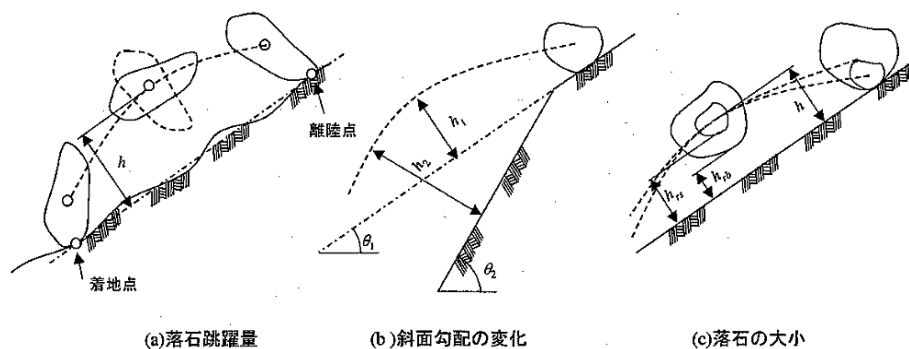


図 4.1.3 落石運動の種類[1]

4.1.2 既往落石実験にみるこれまでの研究

落石災害を防止するためには、まず落下中の落石の、落石規模や形状、跳躍や転がりといった運動との関係、衝突時のすべりの有無や、さらには線運動エネルギーと回転エネルギーとの比などの運動特性を把握する必要がある。この問題の解決を目的として、これまでも多くの実験が行われている。

我が国で最初の落石実験が行われたのは、北海道雷電岬(1991)での実験が最初といわれる。以後、全国 19～20 箇所あまりで実験が行われており、その詳細は文献[1]にまとめられている(図 4.1.2)。現場実験は、初期の頃の実験では、対策工計画位置での速度、防護柵の高さを決定するための跳躍高さなど、落石対策計画に必要な主要ポイントを把握することに主眼が置かれていた。このためか、その頃の実験結果では、計測された係数の種類一つとっても、ある実験では法線方向速度比のみ、またある実験では速度エネルギー比のみ、というように一定していない。衝突時の係数に関する特性の研究が盛んに行われるようになったのは、数値解析に関する研究が活発になる 1990 年頃からである。これに対し、ヨーロッパ(イタリア、スイス)やアメリカ、カナダなどでは、古くから落石の運動やシミュレーションに関する研究が行われている[2][3][4][5]。

落石の運動を捉えるための実験は、大きく現場実験、室内実験、事後解析に分けられ、いずれも文献[1]に詳しいが、ここでは室内・現場の落石実験結果から、得られた衝突時の係数や摩擦などの特性を抽出してまとめる。

(1) 既往の室内実験

室内実験は、単純な斜面を仮定したモデルのもとで、形状、物性の明らかな材料条件の

もとで、基礎的な挙動を捉えることができる。

谷口(1985), 古賀(1989)は, 鋼板に布やゴムやサンドペーパーなどを貼り付けて, ガラス玉を自由落下させたときの反発状態や軌跡の観察を行った[6][7]. 実験は, 反射板の傾斜を変えて行われ, 反発係数(法線方向速度比)には法線方向入射速度に依存する傾向があることを報告している。

河原, 室ら(1999)は, 豊浦標準砂の斜面にアルミニウムの円筒体を転がして, また氏平ら(1996)は石膏ボードの斜面に塊状, 平板状, 柱状の小岩塊(1.25~2.54cm)を転がして, それぞれ速度残存係数や形状別の回転および線速度エネルギー比などを計測し, 等価摩擦係数は斜面勾配に比例し, また密度が増すほど大きくなると述べている[8].

右城・八木ら(2000)は, マサ土の模型斜面にコンクリート球を落とす同様の実験を行い, 軌跡の他, 速度残存係数や速度エネルギー比, 衝突点のくぼみ等を計測し, その結果から, 各種の運動定数の基礎的な性質, 特に衝突時の係数に関する特性を得ている[9]. 本結果からも, 古賀(1989)同様に, 法線方向速度比には斜面法線方向の入射速度に大きく依存することを述べている[1].

Wu ら(1984)は, 木材による反射板(3m×3.6m)を作成し, これに 20~45cm の岩塊を角度を変えた反射板の上に落下させるという大型実験を行って, 衝突角と反発係数(法線方向速度比) との関係を求めている. Wu らの実験結果は, 入射角度の定義が異なるため図を見る際に注意が必要であるが, ここからも法線方向速度比(R_n)には入射角度に依存する性質のあることが読みとれる[10].

Chau ら(1999)は, 径 6~15cm の石膏で作成した人工岩を反射板上に落下させて, 土砂斜面の乾燥密度と含水比が反発係数(法線方向速度比)に与える影響を調べている. 彼らは, 反発係数は乾燥密度の増加, つまり地盤が硬くなるほど大きくなると述べている. 彼らの実験結果からは, 速度比が入射角度に依存することが読みとれるが, これについては特に触れられていない[11].

我が国での実験が, いずれも速度残存係数, 等価摩擦係数, あるいは回転エネルギー成分の大きさ, 変化などに着目しているのに対し, 海外での実験のほとんどが衝突時の各係数の特性を調べることに注力されている点が大きな相違といえる。

室内実験結果から得られた事項は, 以下のようにとまとめられる[1].

- ①入射角度の法線成分が大きいほど法線方向速度比(R_n)は小さくなる.
 - ②地盤が密な(硬い)ほど, 法線方向速度比(R_n)は大きくなる.
 - ③地盤が緩いと衝突時にすべりを生じ, 密な場合にはすべりが停止する.
 - ④地盤が緩い場合の接線方向速度比(R_t)は, 接線方向入射速度の増加に伴い大きくなる.
- また, 接線方向速度比(R_t)は, 入射角には依存しない.
- ⑤自由落下直後の角速度の変化は, すべり摩擦係数が大きいほど大きい.
 - ⑥回転エネルギー比(E_r/E_v)は, 斜面勾配が大きくなるにしたがって, また直径が大きくなるにしたがって小さくなる.

⑦平坦地に衝突すると、法線方向の線速度エネルギーのほとんどを失う。

なお、室内模型実験には、前述の実験の他にも、シミュレーション解析に用いる定数の決定法提案を目的としたものもある。例えば、藤村(1986)は、鋼球や花崗岩を整形した球体による反発試験から DEM 解析に必要な反発係数を推定するための基礎実験を行っている[12]。氏平ら(1997)、熊野ら(2001)[13]も、同様の目的で基礎実験を行っている。これらは、DEM 解析で用いられる最適なタイムステップやバネを検出することが目的であり、この意味では上述の落石運動の物理特性を調べるための実験とは目的がやや異なる。DEM には、バネと実現場から得られた反発係数との関係を直接的に説明した事例が少ない。

(2) 既往の現場落石実験

現場実験は、これまでも多くの実験が行われているが、その目的は解析技術の進歩によって、少しずつ変化している。すなわち、当初の落石実験は、現象の把握と落石対策便覧の方法を検証することが主な目的であったが、近年の実験ではシミュレーション開発を目的としたメカニズム解明の面にも力点が置かれるようになっている。

我が国の現場落石実験は、1961 年に北海道開発局が雷電岬で行ったのが最初といわれる。以後、図 4.1.4 に示すように多くの場所で実験が行われている。

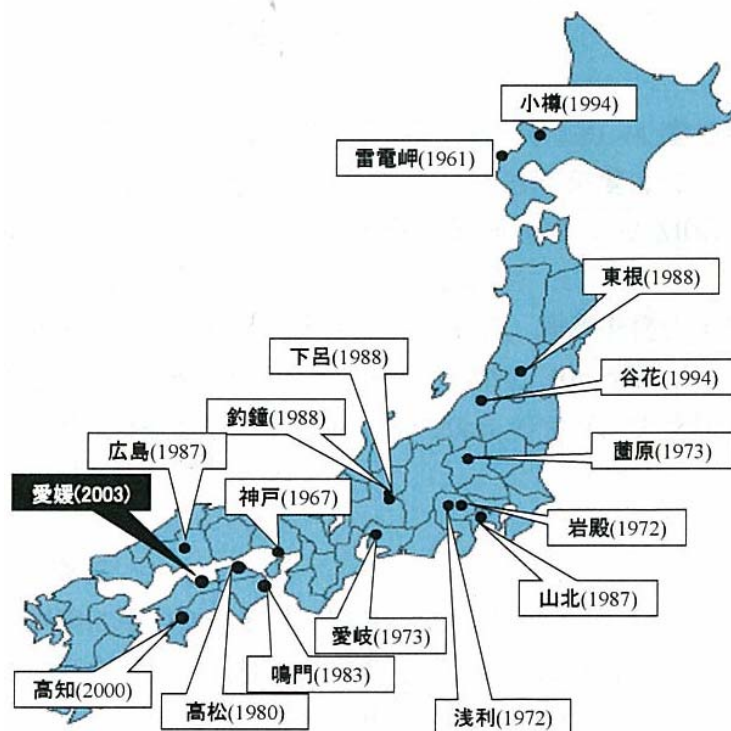


図 4.1.4 既往の主な現場落石実験(右城)

実験は、数 10cm 径の小さな落石を用い、跳躍高さと対策計画位置(主に斜面終端)での速度、エネルギー推定式の確立を目的として行われている。この後、同様の目的の実験が 1990 年代初期まで続くが、その中心となったのは、国交省(旧建設省)と日本道路公団などである。一方、1990 年代の中頃より、民間コンサルタント会社や大学が中心となり、運動メカニズムの解明や、シミュレーション手法の確立を目指した実験が行われるようになった。当初は、石切場(採石場)や施工中ののり面など、比較的単純な形状の斜面を対象とした実験が中心であったが、近年では樹木のある斜面での実験も行われている。

図 4.1.5～図 4.4.8 は、落石対策便覧を中心に実験現場の斜面形状と得られた結果の要点のみをまとめた図である[1]。実験が行われた斜面は、細かい起伏はあるが大きな地形変換点はなく、斜面傾斜は 30° ～ 60° の範囲にある。斜面の性状は、岩盤、コンクリートないしモルタル、崖錐が大半であり樹木はない。落石は、一部の例外を除いていずれも現地の岩砕を流用しており、規模もまちまちである。これまでの現場実験結果をまとめると、およそ次のようである[1]。

- ①入射速度が大きいほど法線方向速度比(R_n)は小さくなる。
- ②法線方向速度比は、落石の硬度と斜面の硬度との組み合わせに支配される。
0.07～0.70(一部、2.83)と分布範囲がひろい。
- ③接線方向速度比は、平均 0.63(広島)以上
- ④入射速度が大きいほどエネルギー損失も大きくなる。
- ⑤入射角が小さいとエネルギーロスが大きく、全エネルギーの 75～85%に相当することもある(Hungr ら)
- ⑥転がり運動は、消費するエネルギーが少なく、到達距離が大きい。
- ⑦落石の運動は、エネルギー損失が最小になるように最大慣性主軸回りに回転しながら落下する。
- ⑧平坦地に衝突すると、法線方向の線速度エネルギーのほとんどを失う。

ただし、初期の実験では、計測した落石の衝突地点の位置が不明であるため、詳細な入射角との関係が推定しにくいことが難点といえる。

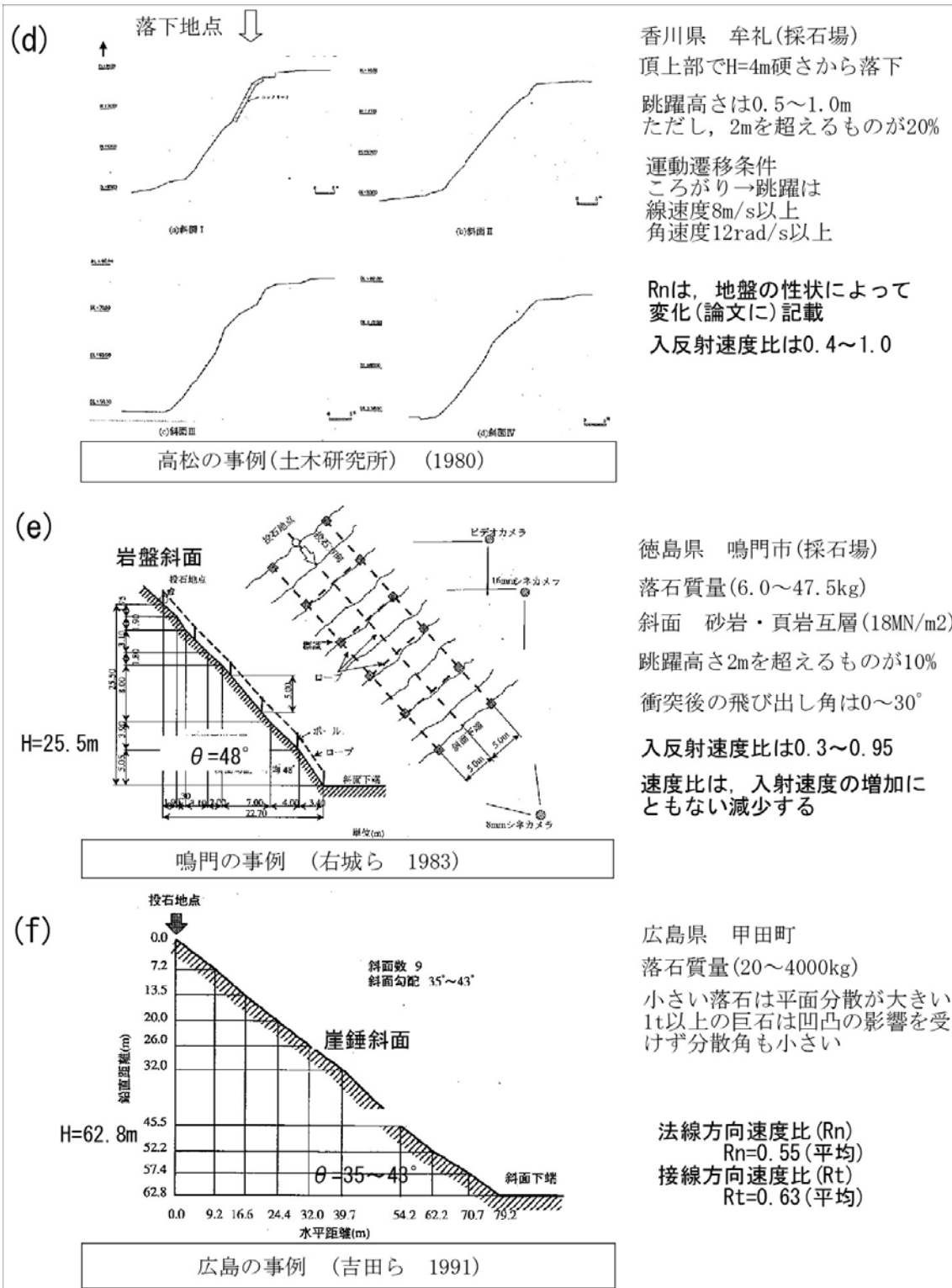
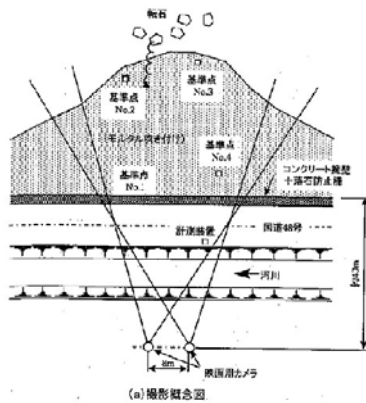
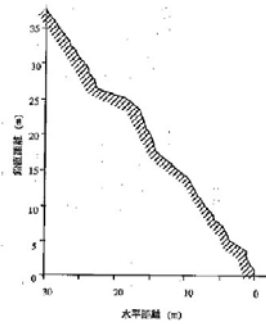


図 4.1.6 現場落石実験(2)

(g)



(a)撮影概念図



(b)のり面断面

山形県 東根市

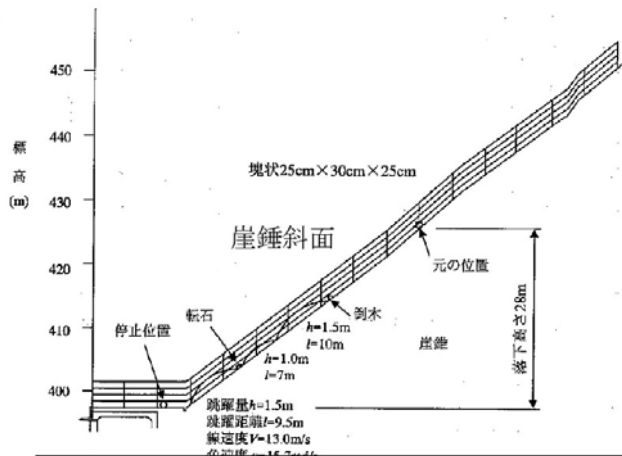
モルタル吹きつけ法面

落下高さ15m以下は2m以下
15m以上になると3~4mが増加

回転エネルギーは線速度
エネルギーの1/10
回転エネルギーは、線速度
が増加しても一定以上には
ならない

東根の事例 (旧建設省東北地建 1989)

(h)



下呂の事例 (旧建設省中部 1990)

岐阜県 下呂

落石 長径 30~100cm
短径 10~30cm

左図は、計測のための
ケーブル標識を記載

遷移条件

跳躍開始速度 平均10m/s

跳躍開始角速度平均18rad/s

2mを超える跳躍は突起物
への衝突が原因

平面的広がり 50°

板状ほどばらつく

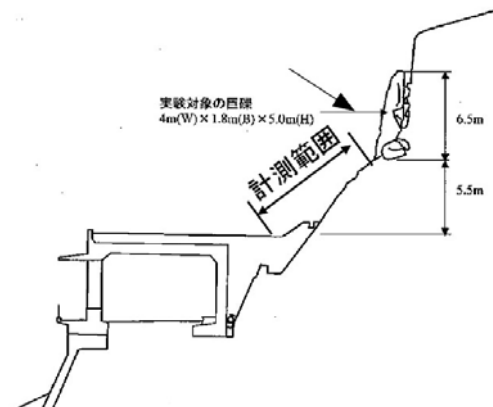
線速度エネルギー比

0.22~0.35

回転エネルギー/線エネルギー

比は、0.01~0.1

(i)



釣鐘の事例 (建設省中部技術事務所 1990)

岐阜県 益田群

岩盤斜面上を薄く崖錘が被う

落石径 0.3×0.3×0.3m~
1.3×1.3×0.7m

法線方向速度比 (Rn)

Rn= 0.247

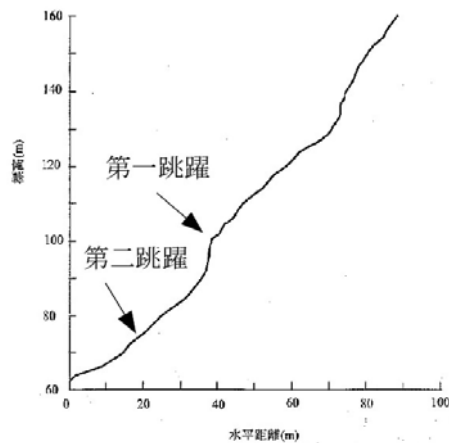
速度エネルギー比 (Ev)

Ev= 0.167

回転エネルギー/線エネルギー
は、0.1以上が多く、0.3以下

図 4.1.7 現場落石実験(3)

(j)



谷花の事例 (道路保全センター 1993)

新潟県 三河村
立木のない露岩斜面
(砂岩・粘板岩, 上部は流紋岩)

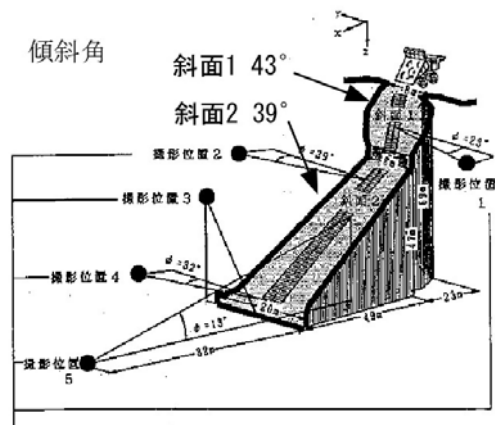
落石(流紋岩) 特大1.0m以上
大0.5~1.0m
中0.5~0.3m

法線方向速度比 (R_n)

速度エネルギー比 (E_v)
計測図あり

入反射角が小さいほど衝突時の
エネルギー吸収が大きい

(k)



小樽の事例 (北海道大学工学部 1996)

北海道 小樽
斜面は小レキが堆積
脚部は長軸径数cm~2.5mのレキが
崖錘状に堆積

落石は, 柱状節理の発達した安山岩
比重2.64 圧縮強度136.7MN/m²

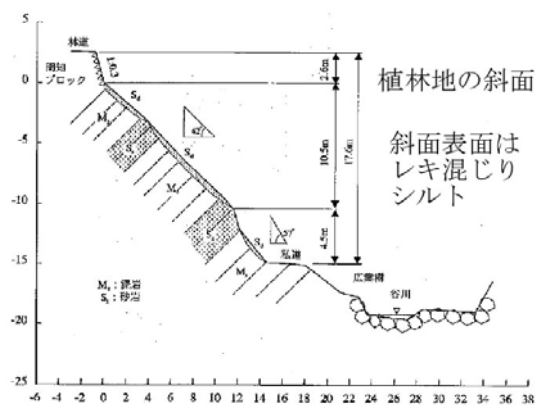
跳躍量はほとんど2m以下

法線方向速度比 (R_n)
 $R_n=0.70$ ($R_t=1.07$)

速度エネルギー比
 $E_v=0.77$

回転エネルギー/線エネルギー比
は, 0.2~0.3

(l)



高知の事例 (右城ら 2001)

高知県 土佐村

落石 砂岩 16~200kg
砂岩玉石21~48kg
コンクリート球 17kg
コンクリート立方体 37~39kg

平面分散は30° 以内
巨石は直進性が強い

速度エネルギー比は
0.50~0.98 平均0.69

回転エネルギー/線エネルギー比
は0.34

図 4.1.8 現場落石実験(4)

4.1.3 落石実験から得られる運動の遷移条件

現場落石実験では、落石のさまざまな挙動が観察される。なかでも、ころがり運動から飛行、飛行から転がりといった運動の変化は、運動の遷移条件と呼ばれている。このような運動の変化は、衝突地盤条件の変化や岩塊の形状、回転の状態などによって生じるものと考えられ、その考慮が難しい質点系シミュレーションでは、経験的入力値として扱われる。

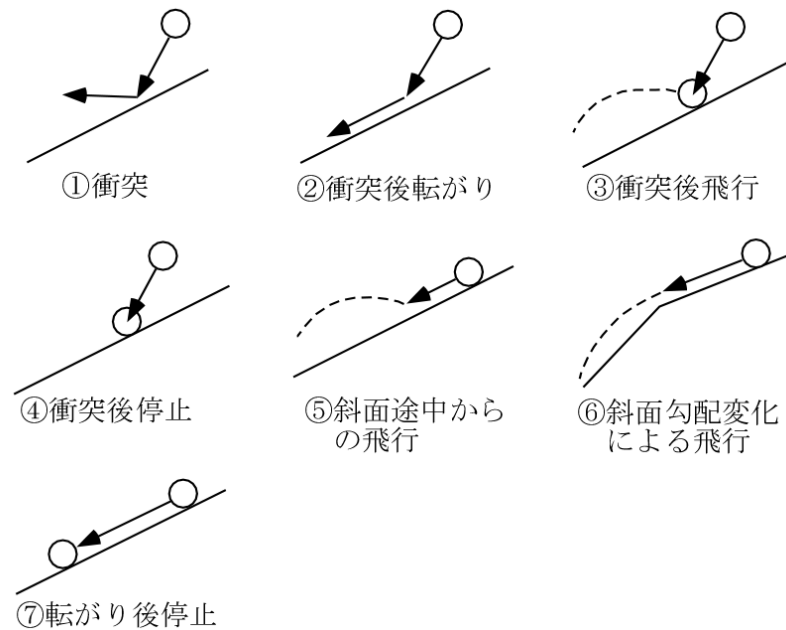


図 4.1.9 落石運動の遷移条件と質点系落石シミュレーションへの導入[1]

このような運動の代表的変化には以下のようなものが知られている。

- 1) 衝突時のすべりの有無や姿勢変化の影響→①②③
- 2) 衝突後停止する運動→④
- 3) ころがり運動から飛行運動への飛び出す→⑤
- 4) 飛び出し角度の範囲→⑥
- 5) ころがり運動の停止→⑦
- 6) すべり運動

1) 衝突時のすべりの有無や姿勢変化の影響

岩塊が衝突する際、そのまま反発する、回転を伴って反発する、すべりを伴って反発するなど、さまざまなケースのあることが知られている。例えば、図 4.1.10(a) (b) は、露岩部での反発であり、衝突時の回転によって姿勢が変化するケースである。一方も図 4.1.10(c) は、衝突時に大きなすべりを伴うケースである。もちろん、すべりと回転が同時に生じる場合もある。

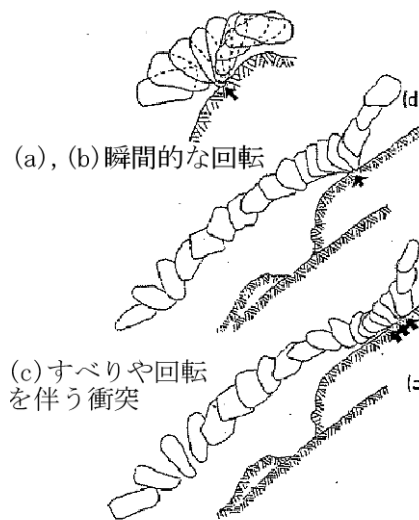


図 4.1.10 落石の衝突時の挙動[3]

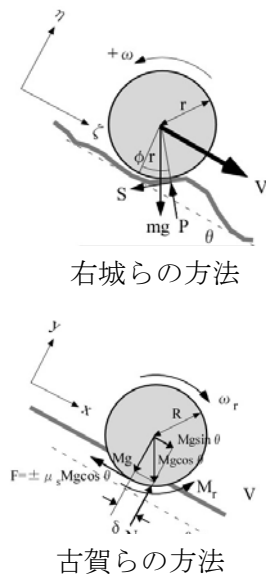


図 4.1.11 質点解析での衝突挙動の扱いの違い[1]

図 4.1.11 は、このような衝突時の姿勢変化を扱うための方法を示したもので、上は起伏を考慮して回転による姿勢変化を扱う右城らの方法を、下はすべりを考慮する古賀ら、榎谷らはの方法を示している。落石問題における衝突現象は、結果全体に大きく影響する主要な運動であり、シミュレーションへの考慮にはさまざまな工夫がなされている。

2) 衝突後停止する運動

飛んできた岩塊が、衝突後に回転が変化したり、ころがり運動から急速に停止に移る場合がある。衝突時のエネルギーは、地盤の変形に伴うひずみエネルギーの他音や熱などに変換されるが、衝突と同時に運動を停止する岩塊には細かいひびが入っている場合もあり、この現象の原因は今のところ明らかではない。

3) ころがり運動から飛行運動への飛び出し

それまで回転しながらころがってきた岩塊が、突然跳躍を開始する状態がしばしば観察される。線運動→跳躍運動に変化するケースであり、この飛び出すときの速度は限界線速度と呼ばれる。しかし、この速度は現場によってまちまちであり、例えば、高松実験では $3 \sim 20 \text{ m/s}$ ($2 \sim 30 \text{ rad/s}$)、鳴門実験では $2 \sim 8 \text{ m/s}$ 、下呂実験では $6 \sim 18 \text{ m/s}$ 、さらに高知実験では $1.2 \sim 1.8 \text{ m/s}$ と、幅が広い。原因は、落石の形状、回転速度、斜面上の凹凸などの影響と考えられる。遷移条件として、入力側で処理される[1]。

4) 飛び出し角度

崖の上部斜面を転がってきた岩塊が、崖から飛び出すときの角度も注目されており、この時の飛び出し角は最大でも水平より 10° 以下とする場合もある[14]。一般には、岩塊規模が大きいほど飛び出し角度は大きいと考えられ、これを遷移条件として入力側で処理する。

5) ころがり運動の停止

斜面を転がってきた岩塊が平坦値に到達したとたんに急速に速度を減じる現象は、どこでもみられる。回転運動は、本来、滑りよりもエネルギー消費が少ない。このため、特に落石形状が円形に近い場合や、斜面での細かな凹凸が少なく硬い場合などは回転が卓越する。特に、斜面の傾斜角が $0\sim 20^\circ$ の緩い斜面で速度が低下すると、回転運動中心の挙動になり、その場合は到達距離も大きくなる。同条件で滑り運動が卓越する場合には、エネルギー消費が大きいため減速または停止に移る。遷移条件として入力側で処理される場合もあるが、質点解析では再現が難しい。

6) すべり運動の原因

下図は、扁平な岩塊のすべりを表している。一般に、節理から分離した扁平な岩塊は、落下しても到達範囲は小さく、たとえ斜面中であっても遠くにとばない。このような現象は、質点解析では解析困難である。

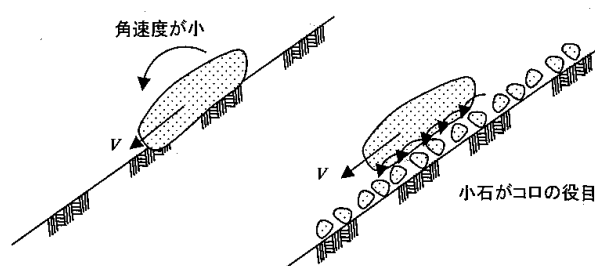


図 4.1.12 扁平な岩塊がすべる運動[1]



図 4.1.13 実際に扁平な岩塊が滑ったあと。

小石がコロの役目を果たしている。写真 2.1.8 の途中斜面

4.1.4 落石衝突時の諸常数の特性

落石衝突時のエネルギー損失を表す方法として、速度比が用いられる。質点解析では、しばしば法線方向速度比と接線方向速度比とに分けて扱われる。法線方向速度比は斜面法線方向、すなわち跳ね返りの高さに影響する係数であり、接線方向速度比は、斜面接線方向への飛行距離に影響する係数である。この他、DDA では、速度エネルギー比がもちいられる。

落石シミュレーションにおいて、これらの入力値の設定には、既往の実験結果を参考にしたり、現地の落石調査結果をもとに逆算的に推定するなどの方法がとられる。右城らは、既往の 10 箇所あまりの現場観察実験結果を再分析して、これらの係数を斜面の性状別に次のように報告している[15]。

表 4.1.1 R_n, R_t, E_v の平均値

	土砂斜面	岩盤斜面
法線方向速度比(R_n)	0.61 ± 0.231	0.54 ± 0.262
接線方向速度比(R_t)	0.65 ± 0.235	0.76 ± 0.181
速度エネルギー比(E_v)	0.71 ± 0.19	0.66 ± 0.23

一方、下の図は、このうち法線方向速度比と接線方向速度比の範囲を標準偏差円でプロットした図である。同図には、海外の報告例も合わせてプロットした。海外での事例は、崖錘や岩盤といった落下経路の地盤性状に応じた関係が比較的明瞭であるのに対し、我が国の R_n, R_t の分布は広範囲に及び、なかには 1.0 を超える例もあるなど、地盤性状との対応は明瞭ではない。

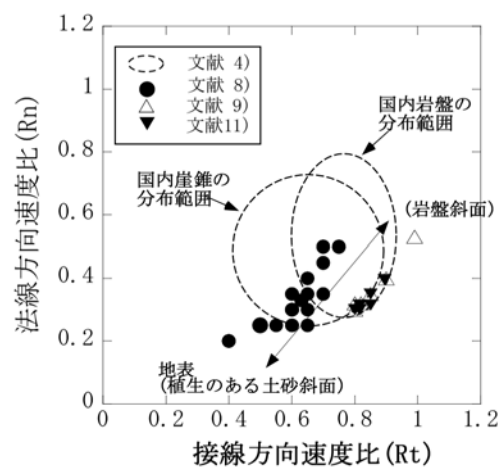


図 4.1.14 法線方向と接線方向速度比の関係

4.1.5 速度比と速度エネルギー比の法線方向速度依存性について

速度比はこれまで、地盤の性状に応じて変化する値であるが、その一方、これまでの研究によって、その法線方向成分、すなわち法線方向速度比(R_n)には入射時の角度や速度に大きく依存する性質があることが明らかとなっている。図 4.1.15 は、法線方向入射速度と法線方向速度比との関係を示した古賀らの実験の例である。実験は、直径 2.4cm のガラス球を高さ、30cm,50cm,70cm から落下させ、その軌跡から反発係数(法線方向速度比(R_n))を計測している。その際、反射いたの角度を $0, 30, 45, 60^\circ$ と変化させている。結果として、ガラス玉の反応が鋼材とゴムとで大きく異なること、すなわち法線方向速度比(R_n)が材質によって異なること、斜面法線方向速度が増すほど反発係数は小さくなる傾向が確認されている[7]。

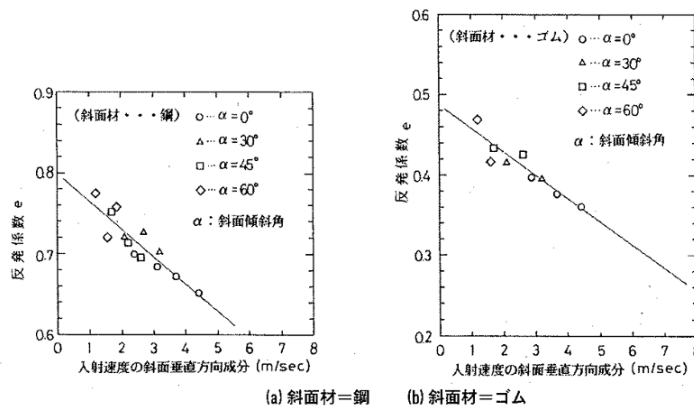


図 4.1.15 R_n と法線方向入射速度との関係[7]

一方、Wu や Chau らは、法線方向速度比(R_n)の入射角度との関係について実験している[10][11]。図 4.1.16 は、Chaw らがまとめと R_n と入射角度に対する報告である。彼らは、222f/sec の高速度カメラを用いて計測している。そして、彼らが得た $R_n=0.35\sim0.60$ という結果は、Wu らが得た R_n の範囲 $0.1\sim0.8$ よりも狭い。その理由を、彼らは形状の影響ではないかと述べている。ただし、いずれにせよ、入射角度が大きい程 R_n は増加する。なお、 R_t は $0.6\sim0.9$ で、Wu の結果と同様であった。なお、Chau らは速度エネルギー比についても同様の実験を行っているが、これについては後で述べる。

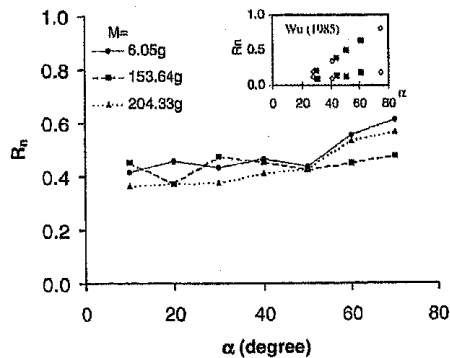


図 4.1.16 R_n と入射角度との関係

一方、図 4.1.17 は、高松の実験結果をもとに作成した図である。本図からもわかるように、この他にも、落石対策便覧参考資料では、このような入射法線方向速度に対する依存性を考慮することでシミュレーションの再現精度が向上することを述べている。

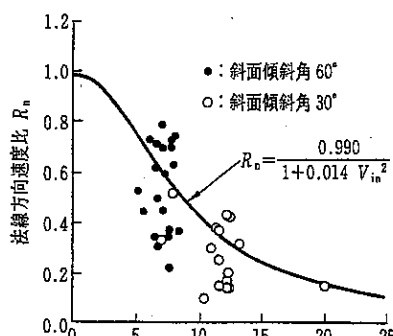


図 4.1.17 Rn の法線方向入射速度依存性[1]

速度エネルギー比についても、同様に入射角度や速度に対する依存性のあることが報告されている。図 4.1.18(a) は、広島での観察事例である。入射速度が速くなるにつれて速度エネルギー比は低下する。同様の関係は、愛岐や小樽など、他の観察実験現場でも報告されている。一方、関らは、新潟(谷花)で行った実験結果から、速度エネルギー比(Ev)には入反射角($\alpha + \beta$)の増加とともに大きくなる性質があることを報告している(図 4.1.18(b))[16]。一方、図 4.1.19 は、Chau らが行った室内実験結果にみる入射角度と速度エネルギー比の関係である[11]。入射角度が大きくなるほど速度エネルギー比は大きくなる。この傾向は、図 4.1.18(b)の傾向と一致する。

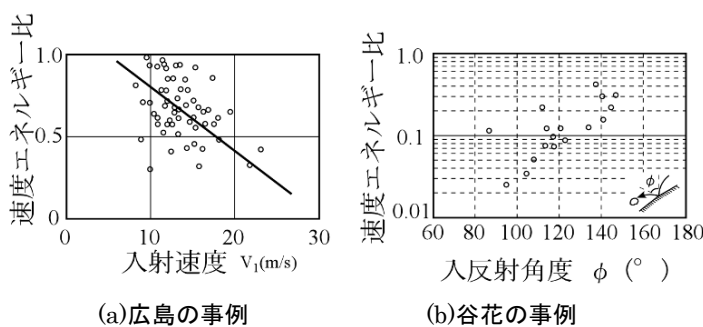


図 4.1.18 速度エネルギー比と入射速度と角度との関係[1][16]

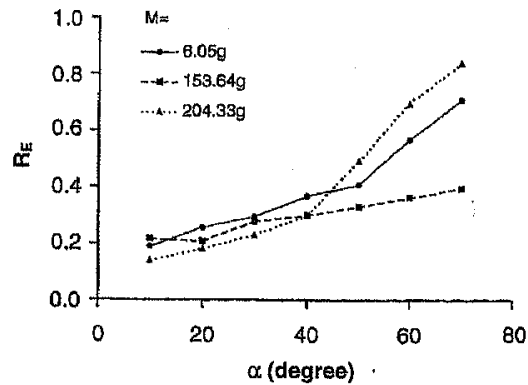


図 4.1.20 速度エネルギー比と入射角との関係[11]

それでは、いったい岩塊が斜面を跳躍しながら落下する際の跳躍点での速度比や速度エネルギー比はどのような変化を示すのであろうか. 図 4.1.21 は, 落石対策便覧参考資料に公表されている例題をもとに, その分布を調べたものである. 現場は, 群馬県の菌原であり, 日本道路公団である[1].

岩盤斜面と崖錘斜面の代表地形と, 各計測点での R_n, R_t, E_v の値を示した. 本図から, これらの各係数の値は, 跳躍点毎に大きく変化すること, その分布は斜面を構成する材料とは関係なさそうであること, しかし, 両斜面ともに R_t と E_v はほぼ同じ変化を示していることなどがわかる. 本図にみる限り, 少なくとも一つの入力値で斜面全体にわたる落石の反発挙動を表すことは, きわめて難しいことがわかる. 残念ながら, 斜面全体にわたる衝突現象を記録した事例はきわめて少ないため, このような斜面全体にわたる運動の考察は難しい.

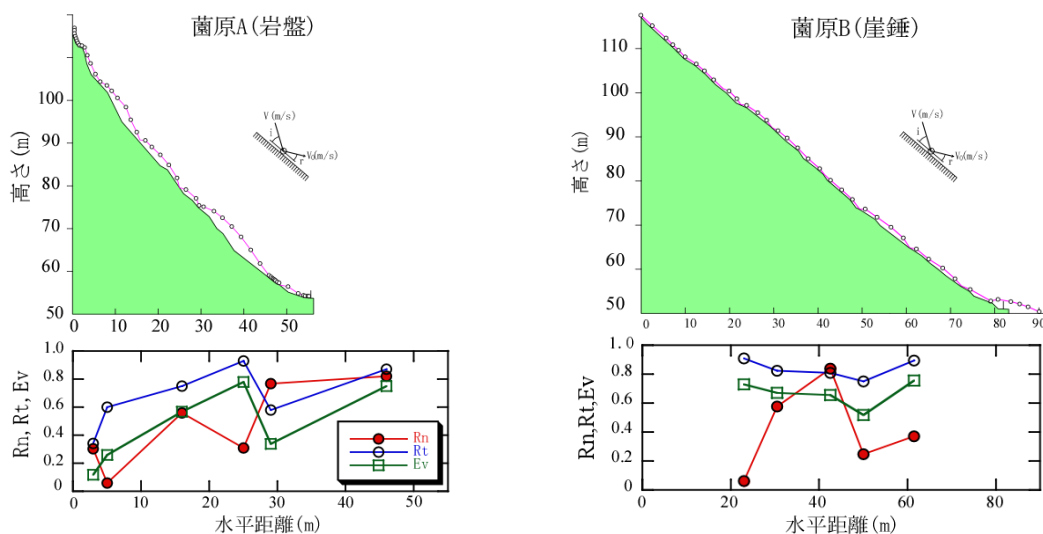


図 4.1.21 菌原実験から得られた R_n, R_t, E_v [19]

4.2 現場落石実験

4.2.1 現場実験の目的と着目点.

斜面を落下する落石の挙動を調べるために、さまざまな現場実験が行われてきた。しかし、高速で落下する落石の挙動を記録することは今でも難しい。

現場実験は、一般に採石場や危険岩塊の除去作業現場を利用して行うことが多いが、安全の面から必ずしも適切な撮影位置を確保できる訳ではなく、また、落石形状の計測を行っても、回転を伴って三次元で運動する岩塊の姿勢や重心を正確に捉えることは特に難しい。また、撮影機材の条件もあり、例えばレンズに広角を用いると細かい挙動が見えず、望遠レンズを使って拡大すると全体像がわからない。高速度カメラは記録時間が数秒に過ぎないため、わずかな範囲の挙動しか記録できない。この他、開始地点で加えられるエネルギーに対するデータ処理時の評価の問題もある。このため、落石の実験条件は室内実験に比べてかなり粗い実験とならざるを得ない。しかし、このような悪条件化のなかでも、岩塊の形状や斜面の細かい起伏や硬さの程度が反発に与える影響(地盤の塑性変形)やばらつきなど、現場実験からしか得られないデータもある。

なお、本実験では、岩塊衝突時の係数に、入射角度や入射速度がどのように影響するかを把握するために、入射角度の異なる条件下での同じ岩塊の衝突を追跡している。図 4.2.1.1 に、本実験のフローチャートを示す。

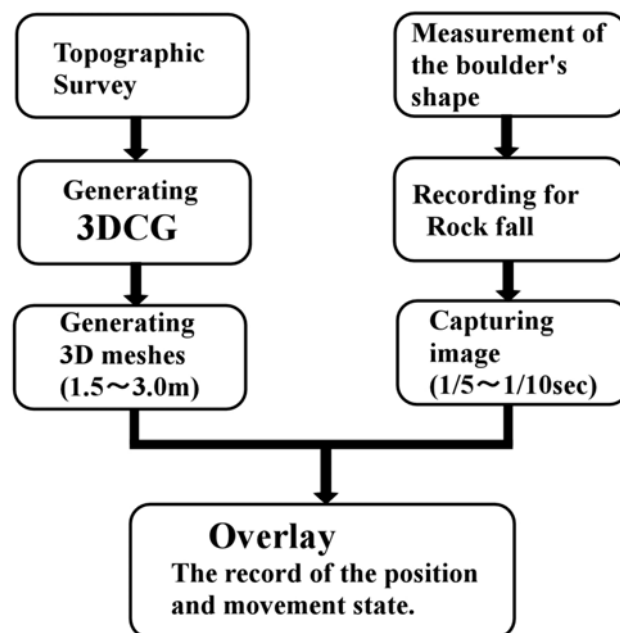


図 4.2.1.1 現場落石実験のフローチャート[17]

4.2.2 現場実験の手順と方法

(1) 落下する岩塊の形状

落下する岩塊の形状を知ることが、落石の形状や質量を把握するだけでなく、落下方向の広がりや衝突時の速度、跳ね返り高さや回転などを計測する際にも重要である。このため、岩塊の形状は事前ないし事後に計測を行った。図4.2.2.1は、現場(c)での写真測量法による計測結果である。また、図4.2.2.2は、現場(a)における簡易計測法である。ただし、いずれも地表面に飛び出た部分は計測できても、地表面と接する部分の計測はできない。

しかしながら、このように計測しても、実際の落下方向に対する回転軸などは、ビデオ画面でみなければわからないという点である。この傾向は、塊状に近いほど顕著である。

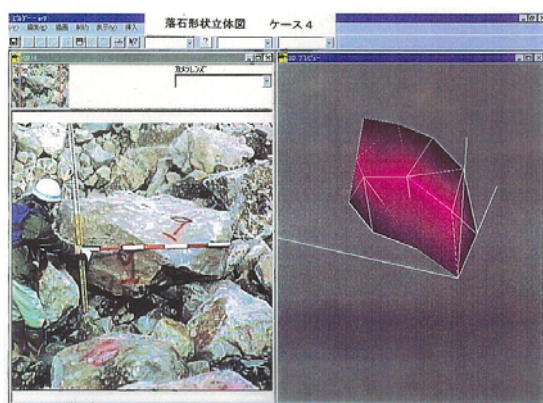


図-4.2.2.1 岩塊の事前計測

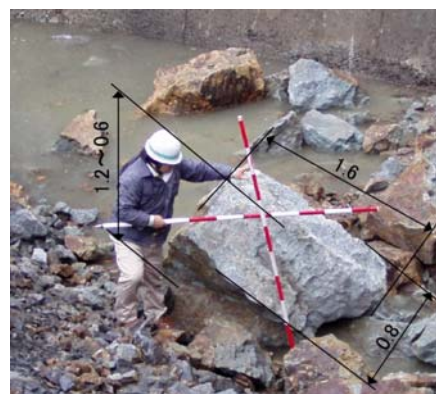


図-4.2.2.2 落下した岩塊の計測

(2) 落下経路の計測

高速で落下、移動する岩塊の挙動を追跡するためには、まず岩塊の衝突位置(跳躍位置)と、跳躍中の高さを把握しなければならない。しかし、施工中の現場では、作業の進行に伴って除去する場所や落下地点の高さも変化する。また、安全上の問題から、解析に最適な撮影位置(できれば30~40mの距離)を確保することが難しく、判読の基準となるスケールの設置もままならないことが多い。

本研究では、このような問題を解決し、落下する岩塊位置を精度よく特定するために、写真測量とコンピュータグラフィックス(CG)ソフトを組み合わせた三次元での観察・計測法を導入した[18]。

この方法では、観察前に写真測量やノンミラー測量などの方法によって、落下経路を含む地形の三次元のメッシュ図を作成する必要がある。手法は、前章で述べた等高線から三次元地形モデルを作成する方法である。この方法では、等高線データをもとに、CGソフトを用いて四角形格子の面要素を作成する。メッシュの間隔は、等高線間隔や観察現場の

状況に応じて 1.0～3.0m の間で調整しつつ作成する。

完成したメッシュ図を，三次元 CG ソフト上で，ビデオ撮影地点を注視点とする画像とビデオ画像とを重ね合わせる(図-4.2.2.3)．このようにして作成された三次元メッシュ図は，各格子点の XY 座標と高さが既知であるため，重ね合わせた画像中において，落石の衝突位置を特定することが可能となる．

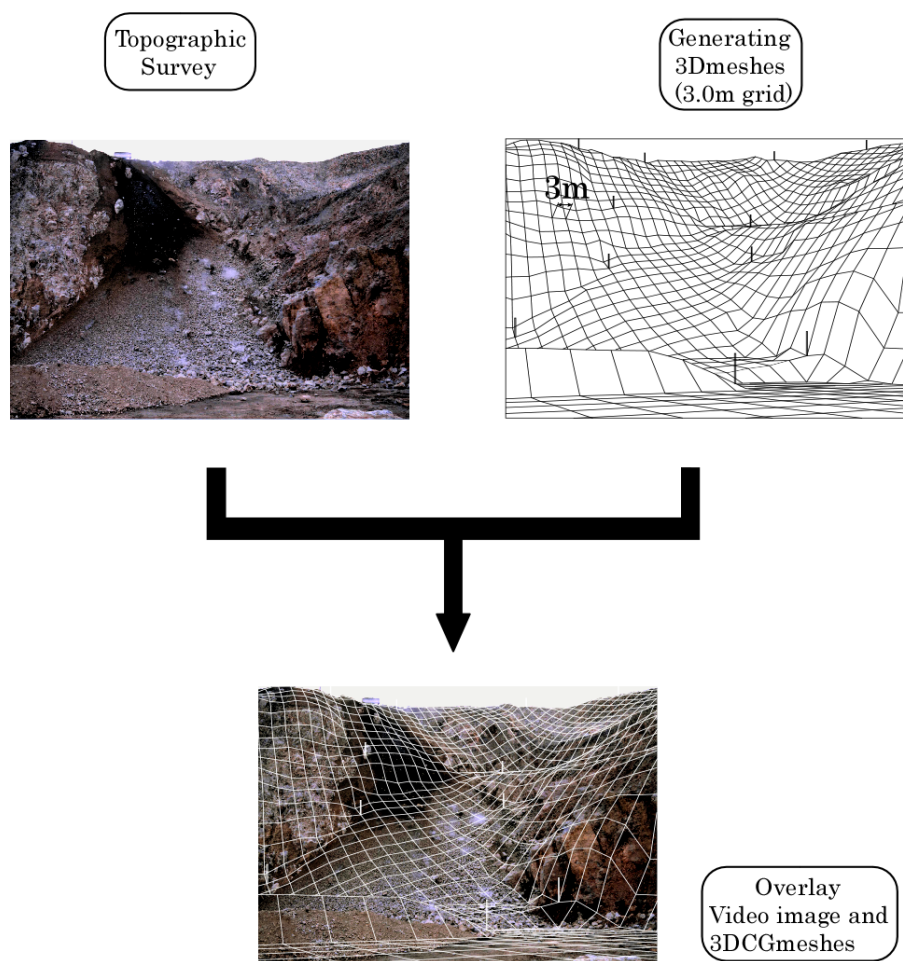


図-4.2.2.3 落石シミュレーションの地形モデルの作成[17]

(3) 落下中の岩塊の読み取り

この方法の特徴は，三次元 CG ソフト上で，任意の場所に任意の大きさのスケールを設けることが可能な点にある．このため，複数方向から撮影した画像中の岩塊の位置や高さも，この仮想スケールを指標にして追跡することが容易となる．

ビデオ画像上に，落下する岩塊を 0.2sec 毎にキャプチャして重ね合わせると，図 4.2.2.4 のようになる．いずれも図中には，CG 上で作成した長さ 2m のスケールを示している．

このようにして作成した合成画像から落下経路の断面図を作成した後、画像上を移動する岩塊の中心を追跡した。

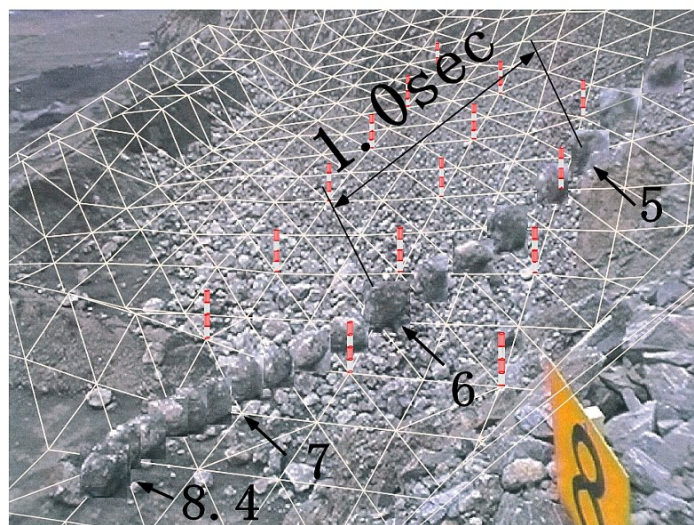


図-4.2.2.4 落下中の岩塊のビデオ画像による追跡(6/30sec) [19]

本現場実験では、ほぼ真横からの観察が可能であった現場(b)では、ビデオとCGの合成画像上に奥行きスケールを設けて読みとった。また、現場(a)(c)では、複数方向からの記録をもとに三次元格子メッシュ図上で落石の位置を読みとった。計測間隔は、岩塊の規模や速度、あるいは衝突時の噴煙の状況によっても変化するが、いずれの現場も3/30～6/30secの範囲である。

計測地点の斜面の傾斜は、図4.2.2.4のCG上の三角形メッシュから、またCGまで作成できなかった現場では代表測量断面から求めた。ただし、CGでのメッシュの間隔は1～3mであり、 R_n, R_t を求める際の入反射角度には、これより細かい起伏の影響は考慮されない。このため、図4.2.2.4に示すような岩砕のようなケースでは、正確な岩塊の入反射方向を求めることが難しい。この点は、落石対策便覧でも指摘されており、その影響は、しばしば計測された速度比の異常値として現れる。

実際の観察では、1時間程の間に30～80近い大小の岩塊の落下が観察される。しかし、ビデオカメラの性能(34万画素、フレーム間隔1/30sec)や撮影距離、岩塊形状の複雑さ、それに衝突時の滑りの有無(明らかに滑りを伴うものは省いた)などの条件を基に篩にかけると、採用できるデータの数はいずれの現場ともに、せいぜい数個～十数個程度となる。観察中に解析可能と判断した岩塊については、最長径及び直交する方向の中軸、短軸径を計測した。

(4) 各種データの計測

岩塊の落下方向とキャプチャ位置の座標(x,y,z)が求まると、各キャプチャ間の速度が求められる。また、岩塊の回転状態が確認できるものについては角速度も求まる。図4.2.2.5

は、岩塊落下方向の断面図に 6/30sec ピッチでキャプチャした岩塊をプロットした計測結果 CG 図である。キャプチャした岩塊間の速度と角速度は、式(4.2.1～4.2.3)より求めた。

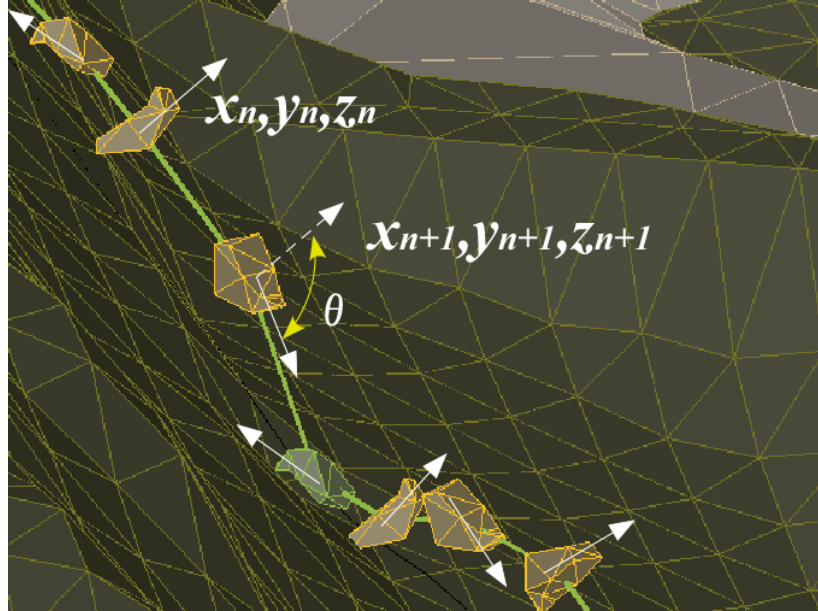


図 4.2.2.5 ビデオ画像読み取り結果(6/30sec)の最終計測 CG 図

<線速度と角速度>

$$l = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2 + (z_{n+1} - z_n)^2} \quad (4.2.1)$$

$$V = l / \Delta t \quad (4.2.2)$$

$$\omega = \theta \cdot \frac{\pi}{180} / \Delta t \quad (4.2.3)$$

ここに、 l は各岩塊間の距離、 V は速度、 ω は角速度である。

なお、初期形状を計測しても転がしてみるまで、回転軸(慣性主軸)はわからない。このため、形状データはビデオで捉えた進行方向の横断形状をもとに作成した。このとき、立体形状を計測できた岩塊については、その形状と画像中の断面とを照らし合わせて岩塊の回転軸を推定した。ただし、落下中の回転軸のブレまでは捉えられないため、立体図上にプロットする際には、落下方向断面上にプロットする二次元の回転として表現している。回転は次のいずれか、あるいは両方を比較して読み取った。

- ・ 1 フレーム(1/30sec)の回転角度
- ・ 1/4～1/2 回転に要するフレーム数(1 フレーム=1/30sec)

このようにして作成された断面図上から，法線方向速度比(Rn)，接線方向速度比(Rt)，速度比(Rv)などを読みとった．

なお，図 4.2.2.5 に示したような最終 CG 図では必ずしも衝突ポイントを押さえていないことの方が多い．このようなケースでは，1/30sec での再読み取り，あるいは衝突の 1 つ前あるいは 1 つ後の間の速度を用いて速度比を求めた．

<エネルギー比>

衝突前後のエネルギー比は，式 4.2.4 を用いて求められる．線速度エネルギー比は速度自乗比から求められるため，岩塊の情報は中心ないし重心座標のみで十分である．

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (4.2.4)$$

一方，回転エネルギー比を求めるためには，まず岩塊の慣性モーメントを求めなければならない．慣性モーメントは，ビデオ画像上からもとめた岩塊の二次元断面形状からもとめた(図 4.2.2.6)．

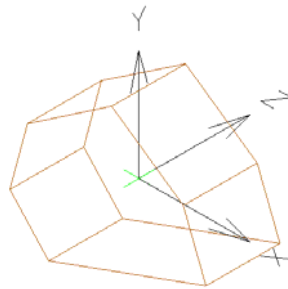


図 4.2.2.6 岩塊の慣性モーメント

$$I = \frac{1}{2}Ar^2 \quad (4.2.5)$$

ここに， I ：慣性モーメント， A ：断面積， r ：半径である．ただし，直接求めることは難しいので，まず，岩塊断面を CAD 状の x - y 平面上に実寸で図化する．この断面図の図心座標を $X=0, Y=0$ とした後，各方向の慣性モーメント(I_x, I_y)を CAD 上で求める．回転軸である Z 方向の慣性モーメント(I_z)は次式で求められる．

$$I_z = I_x + I_y \quad (4.2.7)$$

＜観察した岩塊の特徴＞

3 箇所の現場で、衝突時の入反射角度と入反射速度の計測を行い、主に速度比の特性について調べた。観察時には、図 4.2.5.1 に示すおよそ 4 タイプの反発がみられたが、このうち(a)(b)を中心に計測し、明らかに(c)(d)とわかるものについては計測から除外した。

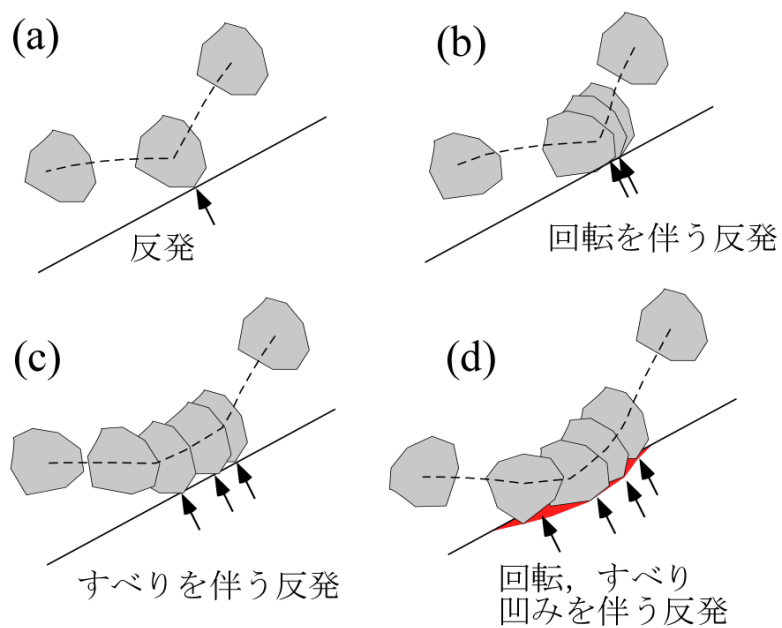


図 4.2.2.7 観察された反発挙動のタイプ

4.2.3 実験現場の概要

落石衝突時の状態を、これまでさまざまな現場で計測してきたが、本研究で述べるのは次の3箇所の現場であり、それぞれ現場(a)、現場(b)、現場(c)と呼ぶ。表4.2.3.1は、これらの現場諸元を示したものである。岩塊の大きさは0.1kN～74kN、落下高さも20m～50mと範囲は広いが、落下経路の性状は、落下岩塊が折り重なるように積み重なっただけの岩砕という共通点がある。

一方、図4.2.3.1は、現場(a)(b)(c)の代表地形断面である。断面図中の矢印で示した現場記号と添え字(例えばa1,a2～c1,c2)は、計測を行った代表的な反発地点を指す。本観察では、各現場ともに、同じ岩塊の2度の反発を追跡して記録した。これは、同じ岩塊の異なった条件での結果を記録することで、規模・形状による影響を極力除くためである。

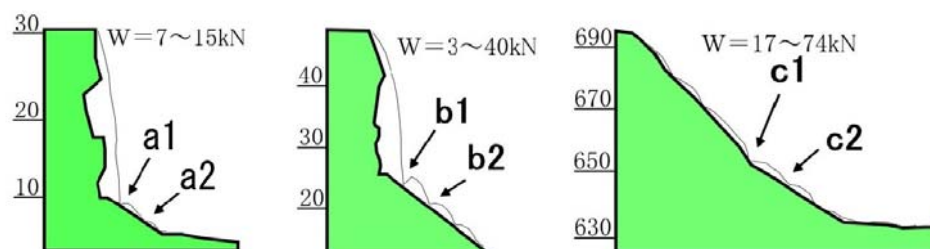


図4.2.3.1 現場実験箇所の代表断面と計測位置

表4.2.3.1 落下岩塊観察現場の概要[19]

観察現場 *観察個数	落下 高さ (m)	落下水 平距離 (m)	平均落 石径φ (m)	落石 重量 (kN)	落石の形状 と 岩 質	落下方向 経路の特徴 ()内は観察内容
(b)現場 (施工中) *38	42	20 ～25	1.0 ～2.0	3 ～23	平均長短比 1:1.5 単体=25kN/m ³ (凝灰角礫岩)	発破とバックホウで除去。 落下経路は、ルーズな礫。 (自由落下と跳躍を観察)
(c)現場 (施工中) *10	63	115	1.5 ～3.0	17 ～74	平均長短比 1:2 単体=26kN/m ³ (安山岩)	ブルドーザーによる押し 出し。 落下経路は、ルーズな礫。 (落下、跳躍、停止を観察)
(d)現場 (施工中) *17	25	20 ～25	0.2 ～1.5	0.3 ～3	平均長短比 1:1～4 単体=25kN/m ³ (安山岩)	リッパによる岩塊除去。 落下経路は、ルーズな礫。 (自由落下・跳躍)

*観察した個数

4.2.4 現場(a) トンネル上部危険岩塊除去工事での観察と計測結果

(1) 現場(a)の概要

北海道恵山町海岸部に位置し、旧国道の町道移管のための防災工事現場である(図4.2.4.2)。岩塊除去は、道路トンネル坑口部直上、落差14m～18mの地点にある。除去作業は、ロングアームによるリッパー除去で行っている。岩塊除去位置と岩塊落下範囲、およびカメラの配置関係を図4.2.4.1に示す。図中の矢印の方向が主たる落下方向であり、これは落下経路の最大傾斜方向である。除去現場では、時々刻々と岩塊が堆積していく。観察は、2回に分けて行ったが、その間にも降り積もった岩塊の高さが増している。最初の落下地点の傾斜(20°)と堆積した岩塊の平均傾斜($36\sim 38^{\circ}$)は変化しないため、1回目と2回目の観察とでは到達距離に違いが表れている。すなわち、a1地点から堤までの落下水水平距離は、1回目の観察時がおおよそ10m前後、2回目の観察時で15m程である。全体として、規模の大きい岩塊ほど遠くに跳ぶ傾向がある。本研究では、2回目の観察結果を中心に述べる。

落下岩塊は、塊状岩塊の他、板状、長柱状のことが多いことが特徴である。落下した岩塊は、最初の衝突地点に14～18m/s、入射角度 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ で衝突した後、2～4mを跳んで次のバウンド地点で再び跳ねる。この最初のバウンド地点をa1地点、次のバウンド地点をa2地点とした。a2地点でバウンドした岩塊は、その後、岩砕状の斜面上を小さくバウンドしながら転がり、そのほとんどは末端に設けた堤の手前(斜面上)で停止する。

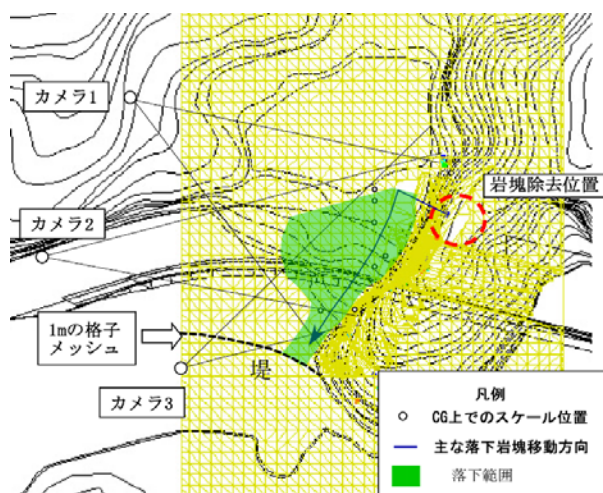


図 4.2.4.1 現場(a)平面図



図 4.2.4.2 現場(a)全景

(2) 計測とキャプチャリング

現場(a)における落石の軌跡は、最初の衝突点以後は、ほぼ直線的に落下する。このため、次の手順で、ビデオデータから速度比と軌跡を計測した。

- 1) ビデオ画像上で、計測する落石を決める(図 4. 2. 4. 3)。
- 2) a1 地点の衝突後、落石の進行方向がわかると、三次元地形 CG の平面上での方向が決まる。同時に軌跡上の x,y 座標が求まり、衝突地点(a1, a2 地点)の x,y,z 座標も求まる。
- 3) ビデオ画像上から、落石の 5/30sec 単位の画像を切り出し(図 4. 2. 4. 4)、ビデオ画像と三次元 CG のメッシュ図とを合成した画像上に配置する(図 4. 2. 4. 5)。衝突点が 5/30sec の位置にない場合は、衝突地点位置を推定する。
- 4) 飛行中の落石位置の高さ(重心(x,y,z 座標))を、合成画面上に配置したバーチャルスケールと別角度から撮影したカメラの画像、あるいは衝突地点からの飛び出し速度と着地点間の関係から求める。この作業は、三次元地形 CG から切り出した断面図上で行う。
- 5) 以上の手順で作成した断面図から速度を求め、各速度比(R_n, R_t, R_v)を計測する。



図 4. 2. 4. 3 ビデオ画像の軌跡図

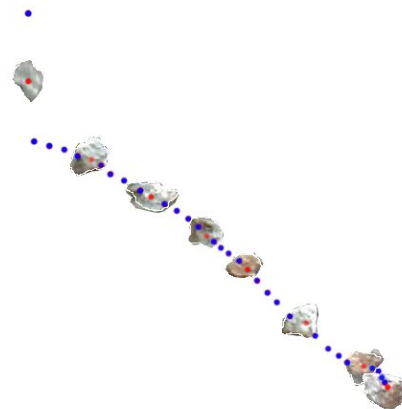


図 4. 2. 4. 4 岩塊キャプチャリング画像
の例

(赤)は 5/30sec, (青)は 1/30sec

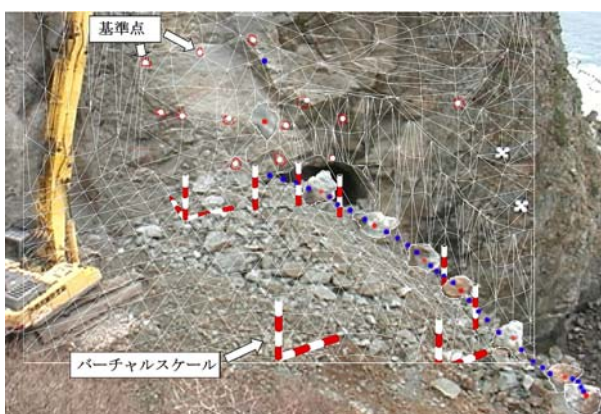


図 4. 2. 4. 5 カメラ(1)位置からのビデオ画像と 3DCG 画像との重ね合わせ[18]

なお、落下のバウンドによって極端に跳ねる方向が変わるもの、衝突地点での地盤変形が大きいもの、衝突時に明らかに大きな滑りを伴う場合には計測を避けた。このようなケースには、岩塊の短辺と長辺の比が 1:2.0 を越えるような岩塊が多い。このため、読みとった岩塊の短辺と長辺の平均比は大略 1:1.1~1.5 程度である。また、ビデオ画像の解像度の制約から、回転が速すぎる岩塊も計測対象外としている。

(3) 軌跡と速度の計測結果

計測した岩塊の平面軌跡図を、図 4.2.4.6 に示す。計測個数は 20 である。また、計測結果を三次元地形図上にプロットしたのが、図 4.2.4.7 である。なお、赤で示した軌跡線は計測した範囲のみを示したものであり、実際にはほとんどすべて堤まで到達している。

計測結果を表 4.2.4.1 にまとめて示す。

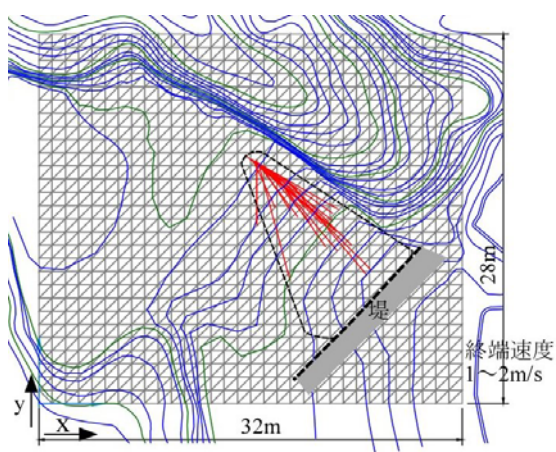


図 4.2.4.6 平面図に投影した軌跡(赤)

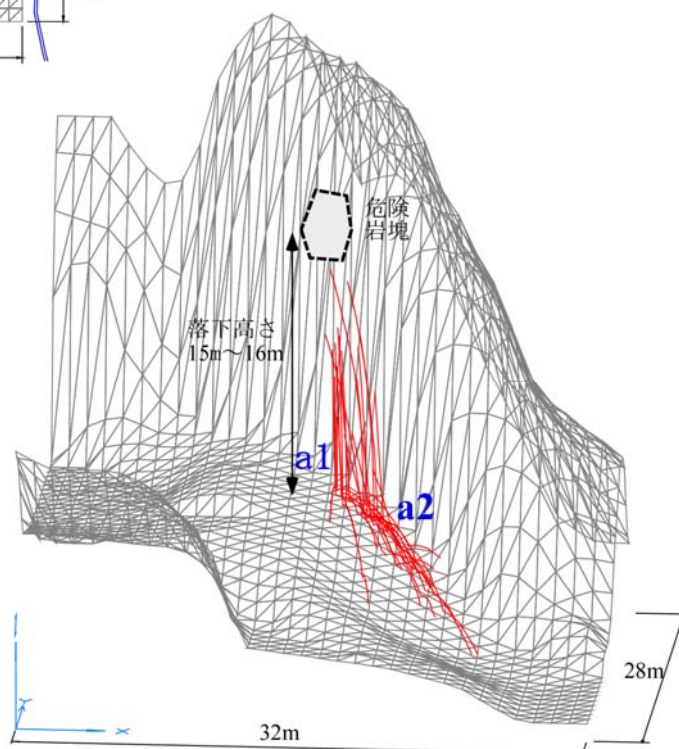


図 4.2.4.7 立体図にプロットした計測岩塊の軌跡図(堤は表現していない)

表 4.2.4.1 現場(a)の計測結果

a1 地点の計測結果

番号	入射 速度	入射 角速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	反射 角速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	速度比	速度エネルギー比 速度	回転
1102	16.37	11.8	14.45	7.69	28.0	5.20	9.4	3.92	3.92	49.0	0.24	0.51	0.32	0.10	0.64
0555	16.40	15.7	14.61	7.45	27.0	5.50	5.9	5.02	5.02	66.0	0.15	0.68	0.34	0.11	0.14
1102	16.40		14.98	6.67	24.0	5.66		4.90	4.90	60.0	0.19	0.73	0.35	0.12	
0616	17.00		15.41	7.18	25.0	5.50		4.66	4.66	58.0	0.19	0.65	0.32	0.11	
0646	17.00		15.65	6.64	23.0	4.20		3.26	3.26	51.0	0.17	0.49	0.25	0.06	
0041	14.50		13.14	6.13	25.0	5.50		2.83	2.83	31.0	0.36	0.46	0.38	0.14	
1503	18.20	15.7	15.76	9.10	30.0	5.00	15.0	4.24	4.24	58.0	0.17	0.47	0.28	0.08	0.91
1703	16.40		12.56	10.54	40.0	5.50		4.33	4.33	52.0	0.27	0.41	0.34	0.11	
1647	18.00		15.26	9.54	32.0	3.50		3.22	3.22	67.0	0.09	0.34	0.19	0.04	
1711	18.00	23.0	15.97	8.31	27.5	7.00	15.7	4.36	4.36	38.5	0.34	0.52	0.39	0.15	0.47
0950	15.40		13.84	6.75	26.0	4.00		3.60	3.60	64.0	0.13	0.53	0.26	0.07	
0951	14.50		12.92	6.58	27.0	5.20		4.75	4.75	66.0	0.16	0.72	0.36	0.13	
1227	16.40		14.86	6.93	25.0	5.50		3.89	3.89	45.0	0.26	0.56	0.34	0.11	
0712	12.00		6.71	9.95	56.0	7.00		6.79	6.79	76.0	0.25	0.68	0.58	0.34	
1453	15.00	15.7	13.37	6.81	27.0	7.00	15.7	4.21	4.21	37.0	0.42	0.62	0.47	0.22	1.00
0448	13.50		9.38	9.71	46.0	3.00		2.46	2.46	55.0	0.18	0.25	0.22	0.05	
0609	13.00		7.46	10.65	55.0	4.00		2.83	2.83	45.0	0.380	0.27	0.31	0.10	
平均	15.77	16.38	13.31	8.04	32.0	5.19	12.34	4.08	4.08	54.0	0.23	0.52	0.33	0.12	0.63
標準偏差	1.80	4.07	2.84	1.54	10.6	1.17	4.47	1.04	1.04	12.2	0.10	0.15	0.09	0.07	0.35

a2 地点の計測結果

番号	入射 速度	入射 角速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	反射 角速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	速度比	速度エネルギー比 速度	回転
1102	9.00	9.4	2.63	8.61	73.0	3.00	7.9	1.85	2.36	52.0	0.70	0.28	0.33	0.11	0.71
0555	5.00	5.9	1.29	4.83	75.0	4.50	15.7	2.89	3.45	50.0	2.24	0.71	0.90	0.81	
1102															
0616															
0646															
0041	6.50		4.75	4.43	43.0	5.00		2.11	4.53	65.0	0.45	1.02	0.77	0.59	
1503	6.50	15.0	2.95	5.79	63.0	4.50	12.0	3.18	3.18	45.0	1.71	0.55	0.69	0.48	0.64
1703	10.00		4.23	9.06	65.0	5.00		2.80	4.15	56.0	0.66	0.46	0.50	0.25	
1647	8.00		3.25	7.31	66.0	5.00		2.11	4.53	65.0	0.65	0.62	0.63	0.39	
1711	8.00	15.9	2.21	7.69	74.0	5.50	9.4	4.81	2.67	29.0		0.35	0.69	0.47	0.35
0950	4.50		2.71	3.59	53.0	3.70		2.75	2.48	42.0	1.02	0.69	0.82	0.68	
0951	8.20		3.47	7.43	65.0	4.50		2.18	3.94	61.0	0.63	0.53	0.55	0.30	
1227	9.00		3.08	8.46	70.0	4.50		2.65	3.64	54.0	0.86	0.43	0.50	0.25	
0712	10.00		1.91	9.82	79.0	5.50		1.24	5.36	77.0	0.65	0.55	0.55	0.30	
1453	8.00	15.7	2.74	7.52	70.0	7.50	15.7	4.19	6.22	56.0		0.83	0.94	0.88	1.00
0448	6.50		1.68	6.28	75.0	4.00		2.00	3.46	60.0		0.55	0.62	0.38	
0609	5.00		2.42	4.37	61.0	4.00		2.18	3.35	57.0	0.09	0.77	0.80	0.64	
平均	7.44	12.4	2.81	6.80	66.6	4.73	12.1	2.64	3.81	54.9	0.89	0.60	0.66	0.47	0.67
標準偏差	1.81	4.5	0.94	1.94	9.6	1.05	3.6	0.94	1.09	11.5	0.48	0.20	0.17	0.23	0.27

本計測においてもっとも注目されるのは、a1 地点と a2 地点での速度比の差である。

図 4.2.4.7 の落下軌跡図をみてわかるように、a1 地点への入射速度は 15.77 ± 1.80 、a2 地点では 7.44 ± 1.81 、また入射角度にも、a1 地点では 32.0 ± 10.6 、a2 地点では 66.6 ± 9.6 と、それぞれ 2 倍近い開きがある。にもかかわらず速度比は 1/2 に減衰し、a1,a2 地点で

の反射角度はともに $54 \sim 55^\circ$ とほぼ同じである。a1,a2 地点ともに同じ岩砕からなる斜面であることから、この違いには入射速度の違いによる斜面側の凹み(塑性変形)の違いと入射角度による影響の可能性が考えられる。

(4) 形状を考慮した挙動

速度を計測した岩塊のうち、岩塊規模が比較的大きく回転の状態が明瞭なものについて、衝突時の回転状態と回転速度を記録した。図 4.2.4.8 は 1 回目の、図 4.2.4.9 は 2 回目の計測記録であり、それぞれ高さが異なるため到達距離は異なるが落下地点と斜面の傾斜角度はほぼ同じである。岩塊の形状は画像から読みとっており、いずれも楕円形状である。奥行きは、落下後の岩塊から推定した。衝突時の反射速度と軌跡は、細長くなるほどその形状に左右される様子が観察され、これが形状による R_n や R_t のばらつきの原因の一つになっていると考えられる。ただし、シミュレーションでしばしば問題となる回転方向が衝突によって逆転する現象はみられない。

なお、図中には速度のみを計測した岩塊の斜面末端到達時の速度範囲を、点線の範囲で示した。1 回目の計測は斜面距離が短いためか斜面末端の手前で停止するものも多かったが、2 回目の計測では斜面末端の堤に衝突する岩塊も増え、最大で 6m/s (平均 3m/s)を記録している。

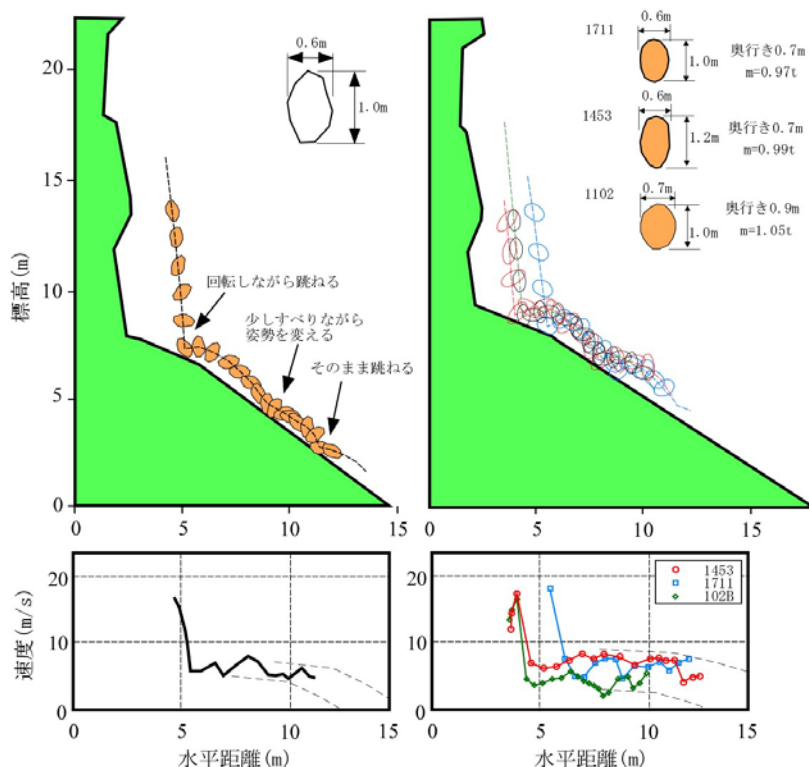


図 4.2.4.8 形状を考慮した
計測(1回目)[21]

図 4.2.4.9 形状を考慮した
計測(2回目)

4.2.5 現場(b) 道路脇の危険岩塊除去工事での観察と計測結果

(1) 現場(b)の概要

兵庫県, 城之崎海岸沿いの道路脇にそびえ立つ高さ 50m ほどの危険岩塊の除去現場である。背後に垂直に, 開口した割れ目が入り, 上ほど開いていることから危険度が高いと判断され, 除去工事が行われた。工事は, 道路を全面通行止めにして発破掘削後, 機械除去 (0.7m^3 バックホウ) により行っている。岩塊落下の観察は, 岩塊落下の比高差が約 30m となった時点でに行った(図 4.2.5.2)。観察は, バックホウが落とすところを狙ったが, このために初速が発生している。

撮影地点は, 図 4.2.5.1 に示すように, 落下直後から海まで続く斜面の上半分であり, 下半分は島状に突き出た露頭の陰になって観察できていない。落下経路の斜面は, 岩塊除去で生じた岩碎の堆積した斜面である。落下経路と撮影地点との距離は 69m と遠く, 周辺に適当な撮影地点が得られなかったために, 現場(b)では断面方向からのみの撮影である。

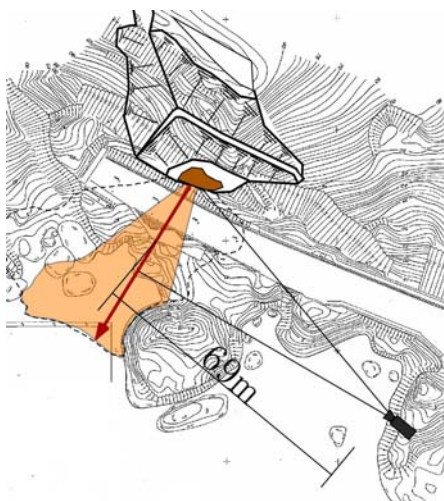


図 4.2.5.1 現場(b)平面図



図 4.2.5.2 現場(b)遠景

(2) 計測とキャプチャリング

現場(b)における落下岩塊の追跡は, 現場(a)同様にビデオ画像からのキャプチャによって行った。主要な落下方向(図 4.2.5.1 中の赤矢印線)とビデオ撮影方向との間には, 約 7° のずれがあるため, これによるみかけの補正を水平距離に対して行った。

本現場では, 落下岩塊の計測採用の可否を落下の方向のみで判定したため, その判定要員を落下開始点に配置し, 撮影と後の画像解析はその記録をもとに行った。

ビデオキャプチャは, $5/30\text{sec}$ で行った。キャプチャ画像の例を図 4.2.5.3 に示す。具体的には, $5/30\text{sec}$ 間隔のビデオ画像から読みとった落石の軌跡を, 想定落下断面中に前述の水平距離補正を行いつつプロットし, それから各岩塊の軌跡と速度を計測した。図

4.2.5.4には、計測した24個の岩塊の軌跡を、また表4.2.5.1、表4.2.5.2にはb1,b2での計測結果を示す。なお、このうち7個については回転状態まで追跡した。



図 4.2.5.3 ビデオキャプチャ画像(衝突時)

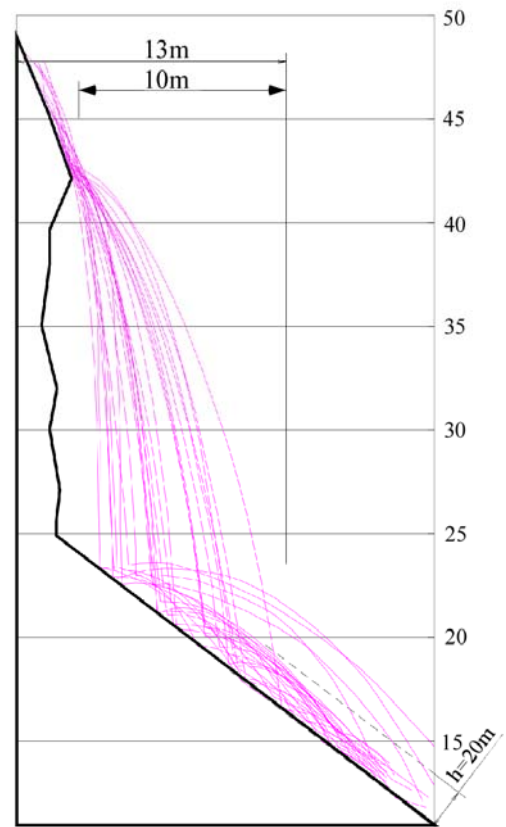


図 4.2.5.4 形状追跡，質点追跡の落下軌跡

図4.2.5.4に示した図は、質点追跡を行った岩塊と後の形状追跡を行った岩塊の両方の軌跡を示している。質点追跡のみの岩塊は規模が小さく形状を読み取れないため画像上での追跡のみに留めたものである。しかし、後の図4.2.5.5と比較するとわかるが、小さな岩塊ほど大きく反発し最大跳躍高さは5mを超えるのに対し、逆に大きな岩塊の反発高さは低い。このような傾向は現場(a)でもみられることから、落石対策便覧で示されているように、反発高さを一律に2mとする理由はなく、むしろ反発高さは岩塊規模と衝突斜面の性状(硬さ)によって決まるのではないかと考えられる。

ここでの計測結果もまた、最初の衝突地点(b1)と次の衝突地点(b2)との速度比には2倍以上の開きがある。入射角度の関係も、現場(a)とほぼ同様である。

表 4.2.5.1 現場(b)の計測データ一覧(b1 地点)

b1 地点の計測結果

番号	入射 速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	Er
951	20.40	15.16	13.65	42.0	6.00	3.78	4.66	51.0	0.25	0.34	0.09
938	22.20	14.58	16.75	49.0	7.80	4.96	6.02	50.5	0.34	0.36	0.12
1040	21.60	14.87	15.67	46.5	6.00	2.91	5.25	61.0	0.20	0.33	0.08
1041	22.20	17.25	13.97	39.0	11.00	9.53	5.50	30.0	0.55	0.39	0.25
1155	22.20	16.50	14.85	42.0	9.00	6.69	6.02	42.0	0.41	0.41	0.16
1712	22.20	15.83	15.56	44.5	4.80	2.82	3.88	54.0	0.18	0.25	0.05
1724	22.20	16.50	14.85	42.0	7.50	3.69	6.53	60.5	0.22	0.44	0.11
1823	24.00	15.10	18.65	51.0	11.00	5.33	9.62	61.0	0.35	0.52	0.21
1824	22.20	16.88	14.42	40.5	9.00	5.85	6.84	49.5	0.35	0.47	0.16
1928	21.60	17.02	13.30	38.0	7.50	5.40	5.21	44.0	0.32	0.39	0.12
1933	21.00	15.48	14.19	42.5	5.00	3.18	3.86	50.5	0.21	0.27	0.06
1940	22.20	15.42	15.97	46.0	6.00	3.27	5.03	57.0	0.21	0.32	0.07
1952	21.60	14.87	15.67	46.5	11.00	6.59	8.81	53.2	0.44	0.56	0.26
1953	22.20	16.50	14.85	42.0	5.30	4.61	2.61	29.5	0.28	0.18	0.06
2015	21.60	16.67	13.74	39.5	6.00	5.35	2.72	27.0	0.32	0.20	0.08
2134	21.60	15.67	14.87	43.5	9.00	5.54	7.09	52.0	0.35	0.48	0.17
2237	22.20	15.28	16.10	46.5	6.60	2.79	5.98	65.0	0.18	0.37	0.09
2305	21.00	16.32	13.22	39.0	6.60	6.29	1.98	17.5	0.39	0.15	0.10
2306	23.40	18.06	14.88	39.5	9.00	5.72	6.94	50.5	0.32	0.47	0.15
2404	21.00	16.43	13.07	38.5	6.60	2.94	5.91	63.5	0.18	0.45	0.10
2453	23.40	17.25	15.81	42.5	7.80	5.93	5.07	40.5	0.34	0.32	0.11
2458	20.40	15.97	12.70	38.5	4.50	3.57	2.74	37.5	0.22	0.22	0.05
2555	21.60	15.49	15.06	44.2	5.00	3.47	3.60	46.0	0.22	0.24	0.05
2619	24.00	16.97	16.97	45.0	5.00	3.72	3.35	42.0	0.22	0.20	0.04
2620	20.40	15.97	12.70	38.5	5.00	3.63	3.44	43.5	0.23	0.27	0.06
2749	19.80	15.50	12.33	38.5	5.40	3.88	3.75	44.0	0.25	0.30	0.07
2827	21.00	14.98	14.72	44.5	6.00	3.90	4.56	49.5	0.26	0.31	0.08
2948	21.00	15.48	14.19	42.5	4.00	2.97	2.68	42.0	0.19	0.19	0.04
3139	21.00	14.19	15.48	47.5	9.00	5.16	7.37	55.0	0.36	0.48	0.18
3156	21.00	15.11	14.59	44.0	6.00	2.63	5.39	64.0	0.17	0.37	0.08
3208	22.80	15.69	16.54	46.5	6.00	2.88	5.27	61.5	0.18	0.32	0.07
3221	23.40	16.97	16.11	43.5	6.60	4.46	4.87	47.5	0.26	0.30	0.08
平均	21.70	15.97	14.65	42.5	6.47	4.26	4.71	47.1	0.27	0.32	0.10
標準偏差	1.10	0.91	1.33	3.1	1.72	1.24	1.77	12.0	0.08	0.11	0.05

表 4.2.5.2 現場(b)の計測データ一覧(b2)

b2 地点の計測結果

番号	入射 速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	Er
951	11.40	3.52	10.84	72.0	8.00	0.97	7.94	83.0	0.28	0.73	0.49
938											
1040	12.60	3.47	12.11	74.0	9.60	2.81	9.18	73.0	0.81	0.76	0.58
1041											
1155	11.70	4.57	10.77	67.0	7.80	4.80	6.15	52.0	1.05	0.57	0.44
1712	12.20	4.10	11.28	70.0	6.70	1.85	6.44	74.0	0.45	0.57	0.31
1724	11.40	1.98	11.23	80.0	4.80	1.24	4.64	75.0	0.63	0.41	0.18
1823											
1824	13.20	6.40	11.54	61.0	7.00	1.93	6.73	74.0	0.30	0.58	0.28
1928											
1933	11.10	8.50	7.13	40.0	5.70	0.99	5.61	80.0	0.12	0.79	0.26
1940	15.00	3.37	14.62	77.0	7.50	1.30	7.39	80.0	0.39	0.51	0.25
1952											
1953	13.80	5.83	12.51	65.0	9.00	4.23	7.95	82.0	0.72	0.64	0.43
2015	9.00	5.03	7.46	56.0	6.00	2.15	5.60	69.0	0.43	0.75	0.44
2134											
2237	11.40	2.76	11.06	76.0	9.00	0.63	8.98	86.0	0.23	0.81	0.62
2305	11.40	6.54	9.34	55.0	7.20	0.50	7.18	86.0	0.08	0.77	0.40
2306	12.60	4.31	11.84	70.0	6.00	2.54	5.44	65.0	0.59	0.46	0.23
2404	12.60	4.31	11.84	70.0	6.60	0.92	6.54	82.0	0.21	0.55	0.27
2453	10.20	3.49	9.58	70.0	9.60	2.48	9.27	75.0	0.71	0.97	0.89
2458	8.40	3.68	7.55	64.0	4.80	1.32	4.61	74.0	0.36	0.61	0.33
2555	13.80	3.34	13.39	76.0	9.00	2.18	8.73	76.0	0.65	0.65	0.43
2619	10.20	3.66	9.52	69.0	7.20	1.25	7.09	80.0	0.34	0.74	0.50
2620	13.20	4.51	12.40	70.0	9.00	1.25	8.91	82.0	0.28	0.72	0.46
2749	9.00	3.52	8.28	67.0	6.00	2.54	5.44	65.0	0.72	0.66	0.44
2827	13.80	4.03	13.20	73.0	9.60	0.84	9.56	85.0	0.21	0.72	0.48
2948	9.60	3.13	9.06	71.0	7.80	0.82	7.76	84.0	0.26	0.85	0.66
3139	10.80	3.78	10.12	69.5	7.20	1.56	7.03	77.5	0.41	0.69	0.44
3156											
3208	10.80	2.80	10.43	75.0	9.00		8.83	79.0	0.61	0.85	0.69
3221	14.40	6.09	13.05	65.0	10.20		9.85	75.0	0.43	0.75	0.50
平均	11.64	4.35	10.65	67.3	7.71	1.62	7.46	77.0	0.41	0.71	0.46
標準偏差	2.00	1.47	2.23	8.9	1.58	0.96	1.60	7.3	0.21	0.13	0.17

(3) 形状を考慮した挙動解析結果

速度を計測した岩塊のうち、岩塊規模が比較的大きく回転の状態が明瞭なものについて、衝突時の回転状態と回転速度を記録した。図 4.2.5.5 は形状追跡を行った 6 つのケースのうち、最大規模の岩塊形状の運動と、現場(b)における代表的な運動を示した。いずれの岩塊も、最初の衝突地点である b1 地点では反発するが、2 回目である b2 地点以後は、滑り運動や回転運動に変化するものが多い。質点追跡では b2 以後も複数回の反発を繰り返しながら落下していくのに比べると、規模の大きい岩塊は反発高さも小さく運動の変化も大きい。現場(a)では岩塊の形状と回転状態が Rn や Rt のばらつきの原因の一つとしたが、規模の違いもばらつきに影響している可能性がある。なお、本現場においてもシミュレーションでしばしば問題となる回転方向が衝突によって逆転する現象はみられていない。

図 4.2.5.6 は水平距離に対する線速度の変化を、図 4.2.5.7 は、角速度の変化を示した図である。線速度が、落下時に上昇し落下直後に大きく低下するのに対し、角速度も落下直後に大きく変化するケースが多い。これは、前述のように落下後に回転や滑りへと、大きく運動形態を変えるケースが多かったことによる。

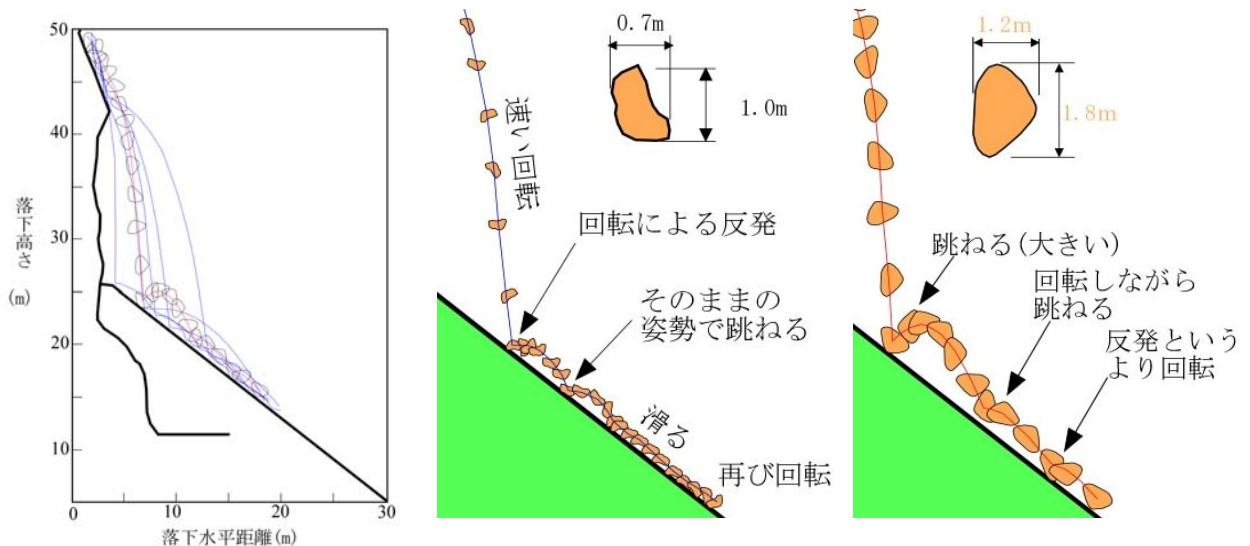


図 4.2.5.5 形状と回転を追跡した岩塊の特徴的な挙動と軌跡

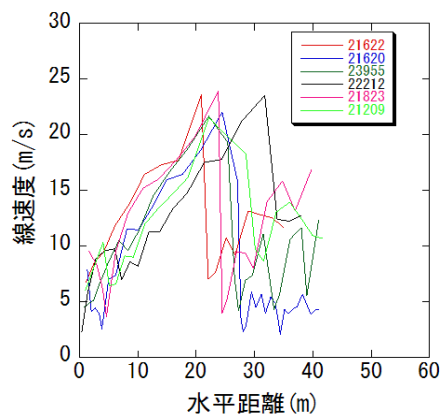


図 4.2.5.6 形状を計測したデータの速度軌跡

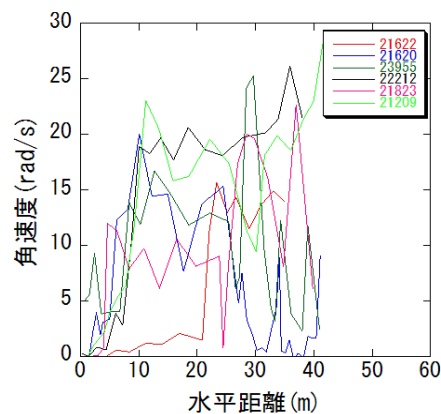


図 4.2.5.7 形状を計測したデータの角速度軌跡

表 4.2.5.3 現場(b) 形状を計測したデータ一覧

b1地点の計測結果

番号	入射 速度	入射 角速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	反射 角速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	速度比	速度エネルギー比	
														速度	回転
To22212	23.50	20.2	16.03	17.19	47.0	12.40		4.75	11.46	49.0	0.30	0.67	0.53	0.28	
To23955	21.70	12.9	16.13	14.52	42.0	7.20	6.1	6.55	2.99	66.0	0.41	0.21	0.33	0.11	0.22
To21622	21.00	2.1	16.55	12.93	38.0	7.10	11.2	2.43	6.67	60.0	0.15	0.52	0.34	0.11	
To21209	19.80	11.3	14.12	13.88	44.5	9.70	9.4	4.18	8.76	58.0	0.30	0.63	0.49	0.24	0.69
To21620	22.00	15.3	15.69	15.42	44.5	3.40	7.5	1.83	2.87	51.0	0.12	0.19	0.15	0.02	0.24
To21823	24.00	9.0	17.55	16.37	43.0	9.50	17.4	5.45	7.78	31.0	0.31	0.48	0.40	0.16	3.74
平均	22.00	11.8	16.01	15.05	43.2	8.22	10.3	4.20	6.75	56.5	0.26	0.45	0.37	0.15	1.22
標準偏差	1.56	6.1	1.13	1.59	3.0	3.06	4.4	1.80	3.36	16.7	0.11	0.21	0.13	0.09	1.69

b2地点の計測結果

番号	入射 速度	入射 角速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	反射 角速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	速度比	速度エネルギー比	
														速度	回転
To22212															
To23955	11.10	9.6	7.13	8.50	50.0	5.70	12.3	2.32	5.21	66.0	0.33	0.61	0.51	0.26	1.64
To21622	7.70	15.7	2.12	7.40	74.0	7.70	12.9	1.47	7.56	79.0	0.69	1.02	1.00	1.00	0.68
To21209	12.40	21.2	2.89	12.06	76.5	10.90	23.0	2.36	10.64	77.5	0.82	0.88	0.88	0.77	1.18
To21620	5.70	0.8	2.89	4.91	59.5	3.90	0.4	2.01	3.34	59.0	0.69	0.68	0.68	0.47	0.25
To21823															
平均	9.23	11.8	3.76	8.22	65.0	7.05	12.2	2.04	6.69	70.4	0.63	0.80	0.77	0.63	0.94
標準偏差	3.07	8.8	2.28	2.97	12.5	3.00	9.2	0.41	3.15	9.6	0.21	0.19	0.21	0.33	0.60

4.2.6 現場(c):採石場での観察と計測結果

(1)現場(c)の概要

本現場は、長野県須坂市郊外の採石場の斜面である。ブルドーザーによる自然シュート後の岩塊の挙動を観察した。落差は約 63m、落下水平距離は 115m である。

岩塊は、ブルドーザーで押し出された後、平均傾斜 33° で、地形の凹凸変化の少ない崖錘相当の斜面上を、低い跳躍を繰り返しながら落下する。計測地点は、写真中の c1,c2 地点の 2 箇所である。この区間は、斜面のほぼ中央であり、落下岩塊の最大速度区間でもある。C1 地点は、小崖の遷急部から飛びだした岩塊が、 $18\text{m/s}\sim 25\text{m/s}$ で飛び込む地点に位置し、衝突時の噴煙の大きさからも地盤変形によるエネルギー損失の最も大きい場所である。その後は、再び c2 地点で大きくバウンドするものの、跳躍は低く小さく、小刻みなものとなり平坦部に達する。平坦部に達した岩塊は急速に速度を落とし、今度はみかけ上回転主体の運動へと移り、最終的には末端に設けられた防護用の堤に衝突して止まる。

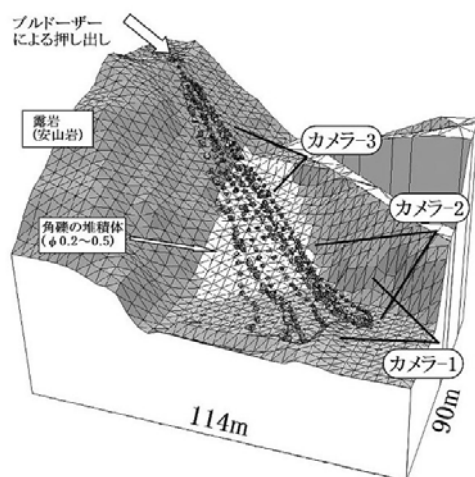


図 4.2.6.1 現場(c) カメラ配置図



図 4.2.6.2 落下する岩塊を 1sec ピッチで追跡 (case8)

(2)計測とキャプチャリング

本現場では、観察以前にあらかじめ落下させる岩塊の形状を写真測量を用いて計測した。ただし、落下中の回転方向(軸)は、実際に落下させなければわからない。各岩塊の落下中の断面はビデオ画像上から読みとり、これに形状計測結果を合わせるようにして回転方向を決定した。

計測は、あらかじめノンミラー測量により作成した 2.5m 間隔の等高線平面図をもとに、格子間隔 3m のメッシュからなる三次元 CG(サーフェイスモデル)を作成し、これを図 4.2.6.1 に示す 3 箇所からの各ビデオの撮影地点の画像と重ね合わせねことで岩塊の軌跡

と姿勢を読みとった。回転は、画像を繰り返して見ることにより、1/30 フレーム間で変化する岩塊の姿勢、あるいは 1/4～1/2 回転に要するフレーム数から換算した。なお、本現場では、落下岩塊の形状をすべて事前に計測している。その落石番号と計測した体積、重量を表 4.2.6.1 に示す。また、c1,c2 地点での計測結果を表 4.2.6.2 に示す。

なお、本現場では、各岩塊の落下開始時からのビデオデータを 6/30sec で解析している。その線速度と回転速度の変化を、現場(a)、現場(b)同様に、落下高さとの関係示したのが図 4.2.6.3 と図 4.2.6.4 である。

表 4.2.6.1 現場(c) 観察岩塊一覧

落石No	体積(m3)	重量(tf)
case 1	2.59	6.73
case 2	2.40	6.24
Case 3	0.66	1.71
Case 4	0.92	2.38
Case 5	1.01	2.63
Case 6	0.87	2.27
Case 7	0.72	1.87
Case 8	2.84	7.40
Case 9	0.85	2.20
case10	0.90	2.34

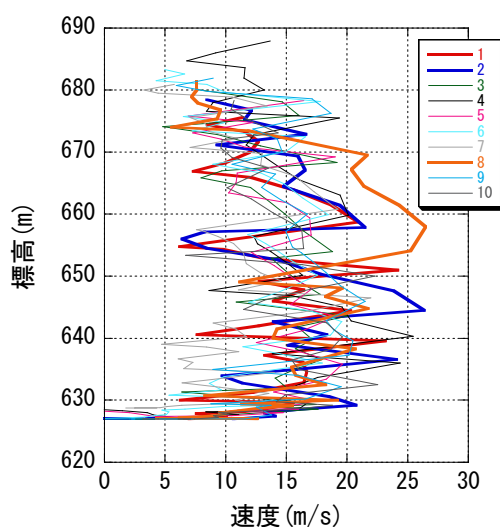


図 4.2.6.3 現場(c) 落下速度と落下標高

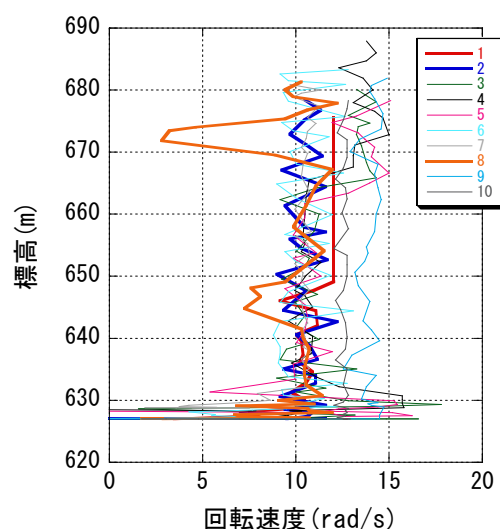


図 4.2.6.4 現場(c) 回転速度と落下標高

表 4.2.6.2 現場(c) 観察結果一覧

c1 地点の計測結果

番号	入射 速度	入射 角速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	反射 角速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	速度比	速度エネルギー比	
														速度	回転
01	20.90	12.0	14.45	19.88	72.0	3.20	12.0	1.50	2.83	62.0	0.23	0.14	0.02	0.15	1.00
02	21.50	10.5	14.61	19.41	64.5	8.30	11.8	4.34	7.08	58.5	0.47	0.37	0.15	0.39	1.22
03	18.80	10.0	14.98	16.75	63.0	13.80	10.7	4.38	13.09	71.5	0.51	0.78	0.54	0.73	1.15
04	20.10	10.5	15.41	19.73	79.0	12.30	10.4	4.90	11.28	66.5		0.57	0.37	0.61	0.98
05	17.00	9.7	15.65	15.76	68.0	12.10	11.1	4.24	11.33	69.5	0.67	0.72	0.51	0.71	1.31
06	18.50	12.0	13.14	17.33	69.5	11.80	9.4	5.45	10.47	62.5	0.84	0.60	0.41	0.64	0.61
07	19.30	9.9	15.76	18.64	75.0	7.60	10.7	4.68	5.99	52.0	0.64	0.32	0.16	0.39	1.17
08	25.30	11.5	12.56	21.57	58.5	11.10	9.4	3.15	10.64	73.5	0.24	0.49	0.19	0.44	0.87
09	15.00	14.2	15.26	14.00	69.0	15.50	13.8	4.92	14.70	71.5	0.92	1.05	1.07	1.03	0.94
10	16.40	12.0	15.97	15.46	70.5	6.70	12.7	3.09	5.94	62.5	0.57	0.38	0.17	0.41	1.12
平均	19.28	11.23	7.00	17.85	68.9	10.24	11.18	4.07	9.33	65.0	0.60	0.54	0.36	0.55	1.02
標準偏差	2.93	1.39	2.71	2.38	5.9	3.71	1.39	1.07	3.71	6.8	0.27	0.26	0.30	0.25	0.23

c2 地点の計測結果

番号	入射 速度	入射 角速度	Vnin	Vtin	入射 角度	反射 速度	反射 角速度	Vnout	Vtout	反射 角度	Rn	Rt	速度比	速度エネルギー比	
														速度	回転
01	24.20	12.0	6.87	23.20	73.5	12.80	12.0	0.89	12.77	86.0	0.13	0.55	0.28	0.53	1.00
02	25.00	9.3	7.10	23.97	73.5	13.90	12.2	1.81	13.78	82.5	0.26	0.58	0.31	0.56	1.72
03	17.80	11.2	4.76	17.15	74.5	10.90	9.9	0.95	10.86	85.0	0.20	0.63	0.38	0.61	0.78
04	16.30	10.6	4.22	15.74	75.0	8.60	9.9	0.45	8.59	87.0	0.11	0.55	0.28	0.53	0.87
05	17.10	9.4	3.26	16.79	79.0	15.30	10.5	0.93	15.27	86.5	0.29	0.91	0.80	0.90	1.25
06	14.50	9.6	4.00	13.94	74.0	11.90	9.2	0.83	11.87	86.0	0.21	0.85	0.67	0.82	0.92
07	11.50	10.7	4.68	10.51	66.0	11.70	9.9	1.12	11.65	84.5	0.24	1.11	1.04	1.02	0.86
08	14.20	10.3	4.51	13.47	71.5	13.90	10.3	1.45	13.82	84.0	0.32	1.03	0.96	0.98	1.00
09	21.50	14.0	4.84	20.95	77.0	18.00	13.6	4.35	17.47	76.0	0.90	0.83	0.70	0.84	0.94
10	16.50	12.6	1.18	16.46	86.0	13.20	12.1	0.35	13.20	88.5	0.30	0.80	0.64	0.80	0.92
平均	17.86	10.97	4.54	17.22	75.0	13.02	10.96	1.32	12.93	84.6	0.30	0.78	0.61	0.76	1.03
標準偏差	4.40	1.52	1.69	4.32	5.2	2.55	1.41	1.15	2.44	3.5	0.22	0.20	0.28	0.19	0.27

(3) 軌跡と速度の計測結果

計測した岩塊の軌跡図を、三次元地形図上にプロットした結果を図 4.2.6.5 に示す。各岩塊を色別に表示している。各岩塊の位置は 0.2sec 間隔である。計測は、本図面をもとに、各落下方向の断面を切り出して行った。なお、姿勢については落下方向のみを考慮した二次元での計測である。

図 4.2.6.6 には代表断面における軌跡図と、落下水平距離と速度との関係をプロットしたものを対比して示した。

本現場は、現場(a)、現場(b)と異なり、計測した c1,c2 地点間の入射角度は 70° 前後であり、入射速度も $18\sim 19\text{m/s}$ でほぼ同じである。形状も塊状の岩塊が多いためか衝突時の滑りや大きな運動の変化は観測されていない。岩塊は、いずれも回転しながら衝突して跳ねている。ただし、図 4.2.7.3 の落下軌跡図をみてわかるように、a1 地点への入射速度は $15.77\pm 1.80\text{m/s}$ 、a2 地点では $7.44\pm 1.81\text{m/s}$ 、また入射角度にも、a1 地点では $32.0\pm 10.6\text{m/s}$ 、a2 地点では $66.6\pm 9.6\text{m/s}$ と、それぞれ 2 倍近い開きがある。にもかかわらず速度比は 1/2 に減衰し、a1,a2 地点での反射角度はともに $54\sim 55^{\circ}$ とほぼ同じである。a1,a2 地点ともに同じ岩砕からなる斜面であることから、原因には入射速度の違いによる斜面側の凹み(塑性変形)の影響の他、入射角度による影響の可能性が考えられる。

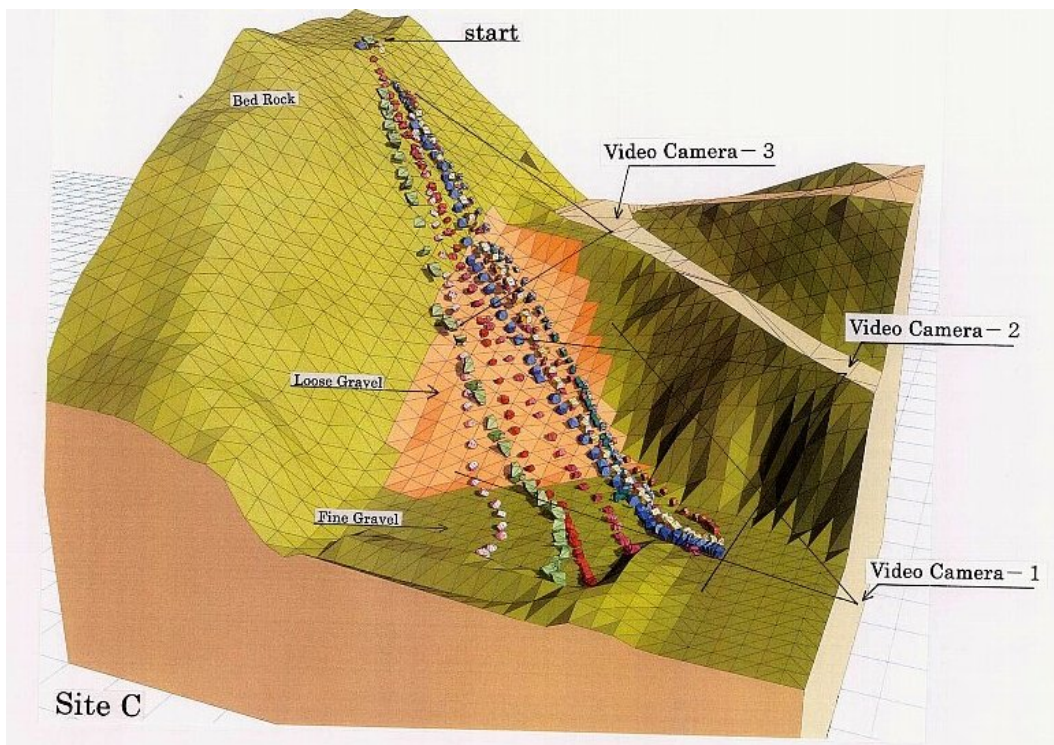


図 4.2.6.5 現場(c)における計測結果(三次元 CG 図上に表現)[17]

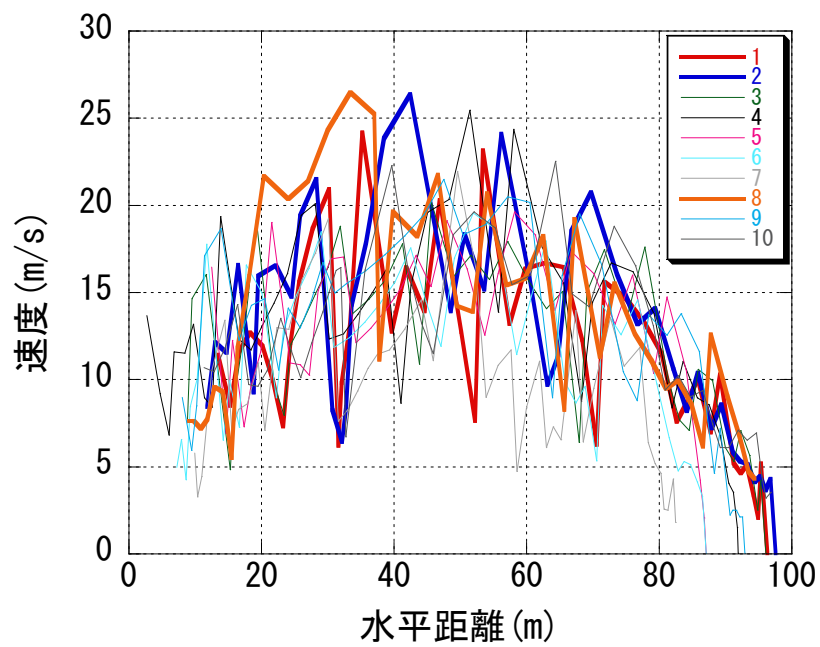
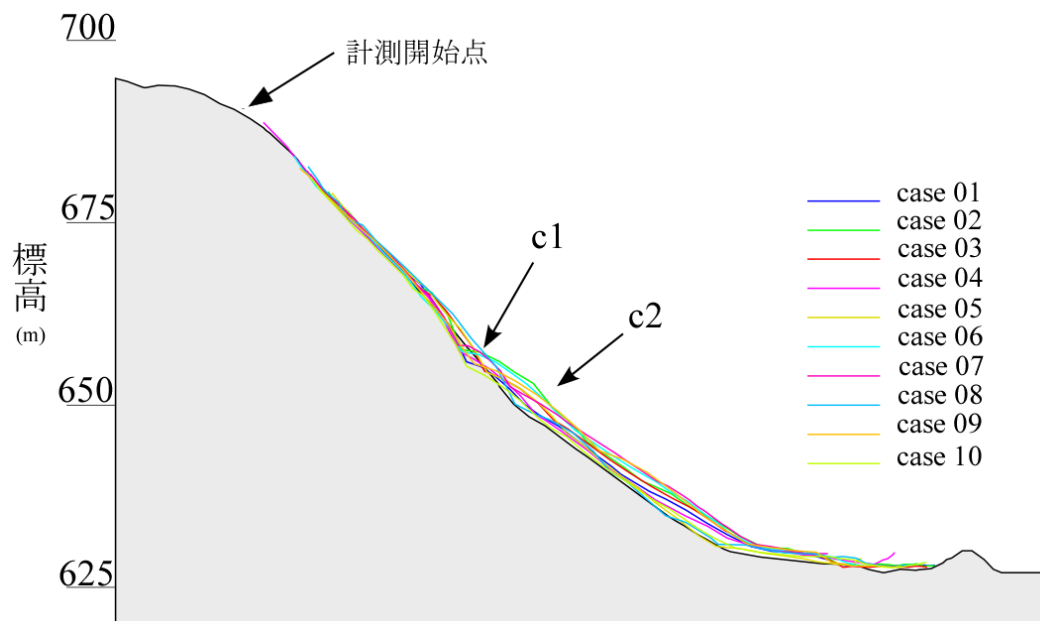


図 4.2.6.6 現場(c) 計測データの軌跡図と速度図

4.2.7 速度比の入射角度と法線方向入射速度の関係

(1) 計測データの特徴

現場実験の目的は、衝突地点での速度比(R_n, R_t, R_v)の計測である。一般に、落石は、入射角度が小さい場合には反発係数(R_n)は小さく、逆に入射角度が大きくなると R_n や R_t が大きくなる特性があるといわれる。ここでは、実際の現場において、その影響がどこに、どのような形で表れ、結果に影響するのかを具体的に調べることを目的としている。

表 4.2.7.1 は、現場(a)(b)(c)の各計測点において計測された結果の一覧である。本結果のなかで最初に目につくのが、入射角度と法線方向速度比(R_n)と線速度エネルギー比(E_v)の関係である。すなわち、 R_n, E_v ともに入射角度が大きいかほど値が大きく、逆に入射角度が小さくなると値が小さくなる。この関係を詳しくみるために、本研究では入射角度の違いに着目した。

表 4.2.7.1 現場実験結果の一覧[19]

		入射速度 (m/s)	入射角度 ($^{\circ}$)	反射速度 (m/s)	反射角度 ($^{\circ}$)	法線方向 速度比 (R_n)	接線方向 速度比 (R_t)	線エネルギー 比 (E_v)
現場 (a)	a1	15.8 ± 1.8	32.0 ± 10.6	5.2 ± 1.2	54.0 ± 12.2	0.23 ± 0.09	0.52 ± 0.15	0.12 ± 0.07
	a2	7.4 ± 1.8	66.6 ± 9.6	4.7 ± 1.1	54.9 ± 11.5	0.76 ± 0.20	0.60 ± 0.20	0.47 ± 0.23
現場 (b)	b1	21.9 ± 1.1	43.0 ± 3.3	7.1 ± 1.1	49.5 ± 12.5	0.28 ± 0.09	0.36 ± 0.13	0.11 ± 0.07
	b2	11.4 ± 2.1	67.7 ± 8.9	7.5 ± 1.8	75.0 ± 8.4	0.48 ± 0.24	0.70 ± 0.14	0.47 ± 0.20
現場 (c)	c1	19.3 ± 2.9	68.9 ± 5.9	10.2 ± 3.7	65.0 ± 6.8	0.67 ± 0.33	0.54 ± 0.26	0.36 ± 0.30
	c2	17.9 ± 4.4	75.0 ± 5.2	13.0 ± 2.6	84.6 ± 3.5	0.30 ± 0.22	0.78 ± 0.20	0.61 ± 0.28

図 4.2.7.1 は、計測した現場(a)(b)(c)毎に、落下岩塊の入射角度を 5° 刻みのヒストグラムで表したものである。このデータから、現場(b)は、 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ と $65^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 、現場(a)は $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ と $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ のそれぞれ 2 箇所ピークを持つ分布を示すこと、一方現場(c)は、c1,c2 地点ともにピークは $70 \sim 75^{\circ}$ の 1 箇所のみであることがわかる。

本論文では、このような入射角度の分布を基に、表 4.2.7.2 に示す 2 つのグループに区分し、以後の解析を進めることにした。ここでは、入射角度 55° 以下を反発グループ A、入射角度 55° 以上を反発グループ B と呼ぶことにする。このグループ区分にしたがって R_n と E_v をみると、a)b)現場の A グループでは値が $0.23 \sim 0.28$ と小さく、B グループでは $0.47 \sim 0.78$ と高い。また、c)現場は、2 カ所の計測点ともに B グループに属し、 R_n については明瞭ではないものの、速度エネルギー比をみると明らかに B グループに入ることがわかる。

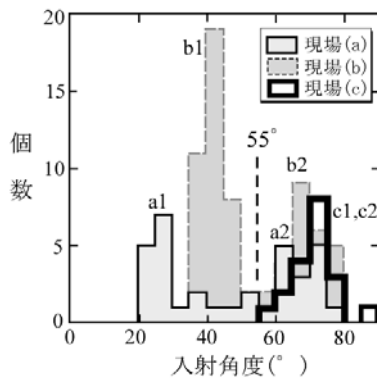


図 4.2.7.1 入射角度のヒストグラム[19]

表 4.2.7.2 入射角度による

グループ区分[19]

	グループ A	グループ B
現場 (a)	a1	a2
現場 (b)	b1	b2
現場 (c)		c1,c2

一般に、斜面がエネルギーを吸収しやすい材質で構成されるほど R_n, R_t が小さく、逆の場合には大きくなる傾向が知られているが、本結果でも同様の傾向が見られる。すなわち、入射角度が小さくエネルギー損失の大きい緩傾斜の反発地点では、 R_n は 0.3 以下と小さく、入射角度が大きくなると R_n は 0.3~0.8 と広い範囲にばらつく。ただし、現場(a)(b)(c)斜面の反発地点がいずれも小さな岩砕からなり、その性状がほぼ同じであることからみると、 R_n のこのような変動には入射角度の違いが大きく影響していることがわかる。

一方、現場(c)での法線方向速度比(R_n)の変動は、このような入射角度との関係が逆転しており、c1 地点の R_n の方が c2 地点よりも値が大きい。しかし、 E_v の値は c1 で 0.36, c2 で 0.67 と観察時のイメージと一致していることから推察すると、c1 地点に高速で飛び込んだ落石が、速度を一瞬減じるとともに高く跳ねる場合が多かったこと、すなわち反射角度の影響が R_n の値に影響したことなどが原因として考えられる。実際、その分 R_t も現場(a)(b)に比べて大きい値を示す。これは、 R_n や R_t が、速度と角度の要素からなり、軌跡には角度の影響が出やすいことが原因と考えられる。このような R_n と E_v の局所的な逆転現象は、図 4.1.21 で示した藪原の事例にもみられる。

(2) 線速度比の衝突時の変化

図は、現場(b)(c)(d)について、現場別に、法線方向速度比(R_n)、接線方向速度比(R_t)、速度エネルギー比(E_v)を入射角度との関係で整理した図である。一方、図- には、同様にして、 R_n, R_t, E_v を法線方向入射速度との関係で整理した図を示した。各図ともに、先に述べたように衝突角度 55° を境に、 55° 以上を A グループ、 55° 以下を B グループとして分けてプロットしている。

<入射角度と R_n, R_t, E_v との関係>

図 4.2.7.2 は、それぞれ上から法線方向速度比(R_n)、接線方向速度比(R_t)、速度エネルギー比(E_v)の変化を入射角度との関係で整理した図である。各図ともに、現場別に記号を変え、また A グループは塗りつぶしで表した。

全体としてみると、入射角度の増加とともに、法線方向速度比(R_n),接線方向速度比(R_t),速度エネルギー比(E_v)の値は増加する様子がわかる。特に、現場 b,現場 d の最初の反発点(b1,d1)の A グループでは、入射角度が小さい場合、すなわち緩斜面に真上から落下するような場合、 R_n, E_v は低い範囲に集中する。これに対し、次の反発点である B グループになると、入射角度の増加とともに値も大きくなる傾向がわかる。

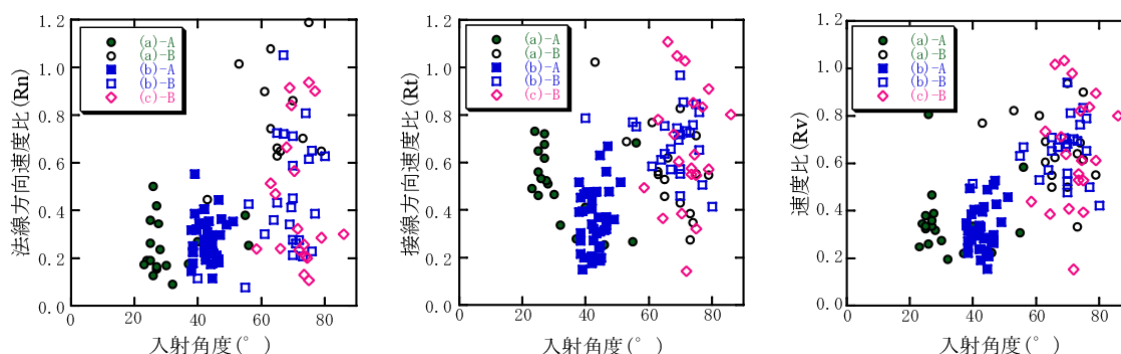


図 4.2.4.2 R_n, R_t, E_v の入射角度との関係[19]

一方、このような現場(a)、現場(b)に比べて現場(c)は、 R_n, R_t, E_v とともに分布が異なる。A, B グループともに入射角度がほぼ同じであるためわかりにくいですが、その値が R_n では $A > B$ であるのに対し、 E_v では逆に $A < B$ となっている。このような現象は、現場(b),(d)には見られない。現場(c)を少し詳しくみてみると、B グループの中では、c1 地点の入射角度の関係だけが、入射角度<反射角度となっている。また、最初の c1 反発点では 0.5 付近を中心にはばらつくが、次の c2 反発点では低い。入射角度がほぼ同じ範囲にあるため、この結果には速度の減少も影響しているとみられる。さらに、c2 地点では R_n が低く R_t が高くなっており、これらのことを考え合わせると、c1 地点では大きな反発運動であったものが、c2 地点からは線運動に変化した様子が想像できる。このことはまた、速度エネルギー比の推移をみても頷ける。原因としては、c1 地点では地盤の塑性変形の影響が大きかったことがあげられる。

<法線方向入射速度と R_n, R_t, E_v との関係>

法線方向入射速度と R_n, R_t, E_v との関係は、入射角度との対比図に比べて値の分布が集中してくることが特徴である。これは、 R_n が、入射角度の影響を考慮しているためとみてよい。ここでも、 R_n, R_t, E_v は、入射法線方向速度の増加にともない減少する。

ここでの大きな特徴は、現場(a)、現場(b)における A グループの集中的な分布である。

現場(b)の方が現場(a)に比べて集中するのは、現場(b)の方が落下高さがあり、衝突時の凹みも大きかったためとみられる。ただし、この衝突時の凹みの影響で、Aグループのデータは大きく低下している可能性がある。

一方、Bグループは、現場(a)と現場(b)で若干違いがみられる。現場(b)で 0.05 から 1.05 まで広範囲にばらつくのに対し、現場(a)ではおおむね 0.5～1.0 の範囲にある。このような意味では、現場(c)での結果は、c2 地点の方が凹みの影響が低く、標準的なこの種の斜面の法線方向速度比(Rn)を表していると考えられる。

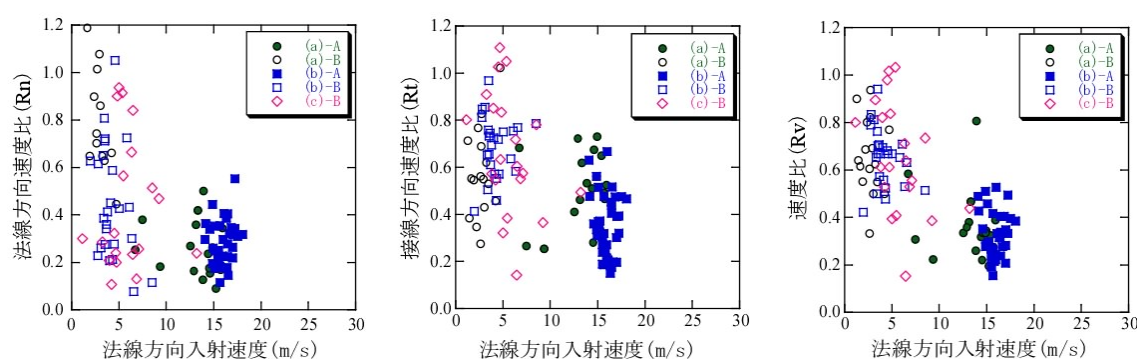


図 4.2.4.3 Rn,Rt,Ev と法線方向入射速度との関係[19]

(2) 角速度比の衝突時の変化

角速度を求めるためには回転を読みとる必要がある。本実験において衝突時の回転まで読みとったのは、現場(a)(b)でそれぞれ 3 箇所、現場(c)で 10 箇所の計 16 箇所である。

<角速度比の入射角度と法線方向入射速度との関係>

計測された角速度自体は、現場(a)、現場(b)および現場(c)において各計測データ表に示したように、6～15rad/sec の結果である。図 4.2.4.4 は、速度比同様、角速度を入射角度と法線方向速度比と対比した図である。本図から、角速度比自体は、法線および接線方向速度比や速度比(速度エネルギー比)と異なり、1.0 以上の値をとる場合もあることがわかる。

本図から以下のことがわかる。

- ① 角速度比は 1.0 を越えることがあり、本実験結果での最大は 1.3 であった。
- ② 入射角度の増加に伴い角速度比(Rav)は増加する傾向がみられる。
- ③ 角速度比(Rav)は、法線方向入射速度の増加にしたがい低下する傾向がみられる。

ただし、②③の傾向は明瞭ではなく、今後は形状等の影響を踏まえた検討が必要である。

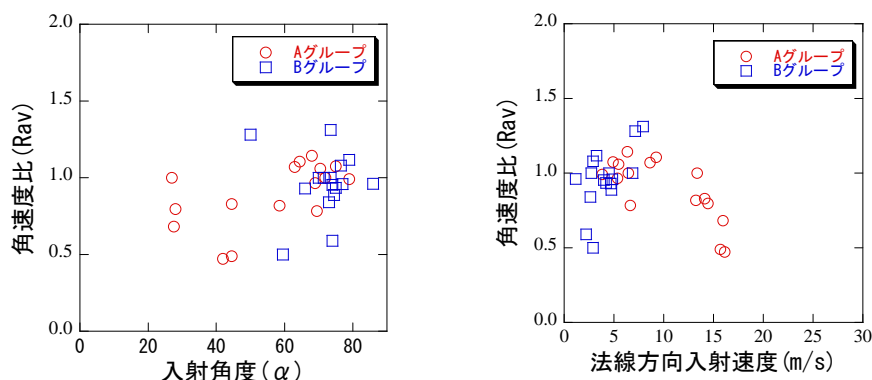


図 4.2.4.4 角速度比と入射角度と法線方向入射速度との関係

4.2.8 斜面を落下する岩塊のエネルギーの変化

落石対策便覧では、対策工計画時のエネルギー評価時に、回転エネルギーは線速度エネルギーの 10%であるとして、次式を示している。

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) m \cdot g \cdot H$$

ここに、 E ：落石の全運動エネルギー、 β ：回転エネルギー係数(0.1)、 μ ：等価摩擦係数、 θ ：斜面勾配、 m ：落石の質量、 H ：落石の落下高さ、 g ：重力加速度。

これまでに多くの観察実験結果があるが、回転まで計測したデータはきわめて少ない。これには、①落石の回転時の慣性主軸が三次元で変化するのに対し、観察時には 1 つの主軸に関する角速度のみから求めるため、回転のブレが大きい場合には計測値は小さくなりがちであること、②落石自体の形状が複雑な場合には、重心に関する主慣性モーメントを正確に求めること自体が難しいこと、③衝突時の斜面の塑性変形は、入反射角度を正確に求めることが難しく、すべりの状態も不明等々、いずれも計測自体が難しいことによる。

(1) 斜面を落下する岩塊の線速度と回転の挙動

図 4.2.4.5 は、現場(c)の case8 と case10 の線速度エネルギーと回転エネルギーの落下直後から停止するまでの推移を読みとり、プロットした図である。全運動エネルギーが速度とほぼ同じ変化をするのに対し、回転エネルギーは小さく、斜面落下中の動きは小さい。ところが、斜面末端に近づき、線速度が急低下してきても、回転エネルギーはさほど低下しない。このため、結果的に回転エネルギーは見掛け上上昇し、斜面末端の停止する寸前では全エネルギーの半分以上を占めるまでになる。

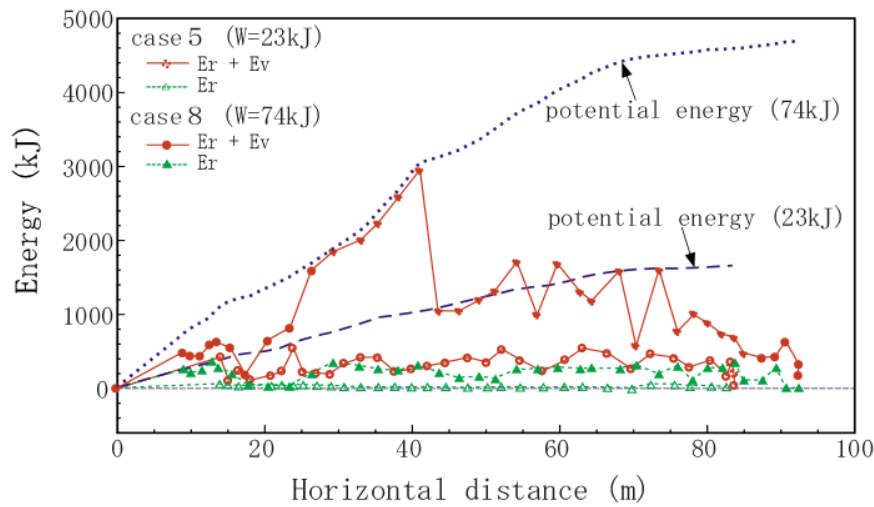


図 4.2.4.5 落下中の岩塊のエネルギーの変化[22]

本結果から、回転エネルギーの線速度エネルギーに対する割合は、求める位置によっても相対的に変化するものであることがわかる。

各実験サイトから得られた線速度エネルギーと回転エネルギーの関係を、サイト毎、重量毎にまとめたのが図 4.2.4.6 である。図中、20kN 以下を青で、20kN 以上を赤で表した。一般に、回転エネルギーは、全エネルギーの 10%程度といわれるが、この条件でみて良いのは、およそ 20kN までであり、それ以上になると 30%以上となることもあり、岩塊形状が大きくなるほど回転が無視できないことがわかる。

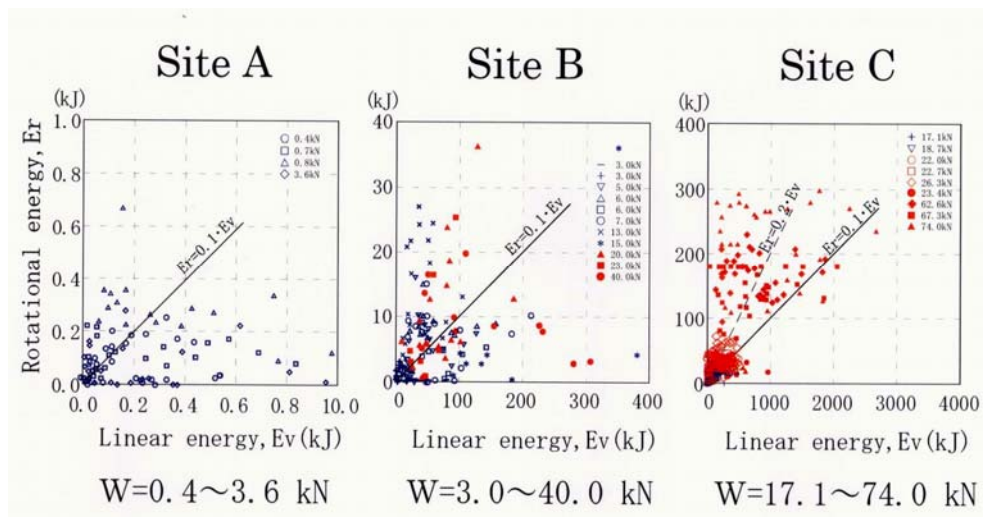


図 4.2.4.6 質量別にみた衝突時の線速度エネルギーと回転エネルギーの割合[22]

(2) 衝突時の回転エネルギーの変化

最大速度で落下中の岩塊の、衝突時のエネルギー変化をみたのが図 4.2.4.7 である。同図は、現場(a)(b)(c)のデータを用いて、衝突時の全エネルギーと回転エネルギーとの変化をプロットした。

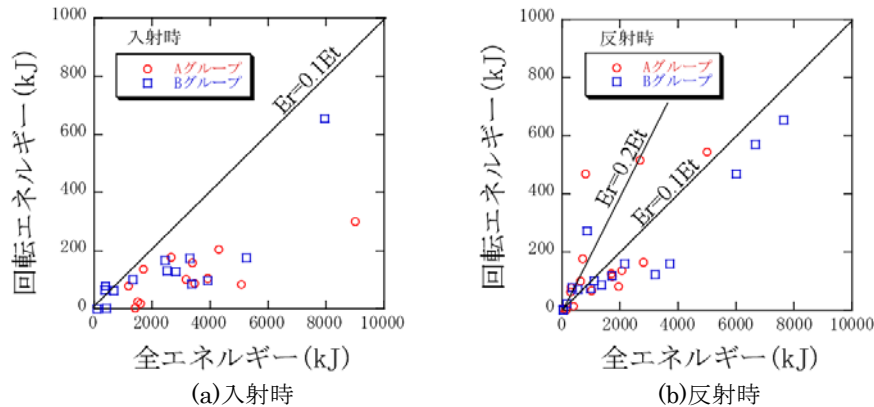


図-4.2.4.7 代表的な衝突点での入反射時のエネルギーの変化

図 4.2.4.7(a)は衝突点への入射時のエネルギーであり、この時回転エネルギー比は全エネルギーの 10%以下、平均すると 5%程度にすぎない。一方、図 4.2.4.7(b)は反射直後の全エネルギーと回転エネルギー比の関係である。ただし、このなかには衝突によって全エネルギー自体が大きく低下するものの、回転エネルギーの比率は 30%近くまで上昇するものも含む。しかし、多くは 10%以下であり入射時と比べてそれほど変化していない。また、回転エネルギーの比率が上昇するのは A グループ、すなわち入射角度が小さい場合に多く、入射角度の大きい B グループでの変化は少ない。

本結果から、衝突によって線速度エネルギー比が低下すると、それに応じて回転エネルギー比もほぼ同様に低下する場合が多いことがわかる。

(3) 衝突時の線速度、回転エネルギーの変化(質量別)

(a)で、回転エネルギーは質量が増すほど増加することを述べた、線速度エネルギーと回転エネルギーの入射角度との関係を質量別に見たのが、図 4.2.4.8 である。残念ながら、回転エネルギー比と入射角度との関係は判然としないが、線速度エネルギー比については、質量が小さいほど入射角度の増加に対する値の増が顕著となること、逆に質量が大きいほどその関係が薄れる様子が見てとれる。

一方、図 4.2.4.9 は、同じく線速度エネルギー比と回転エネルギー比を、法線方向入射速度との関係でみた図である。ここでも、回転エネルギー比の変化には特徴がみられないが、線速度エネルギー比には質量が小さいほど法線方向入射速度の増加にともなって減じる様子と、質量が大きい場合は合いにはその関係が薄れる様子がわかる。後述する室内実験では、1t 以下の場合のこの特徴がさらに明瞭になる。速度依存性などの問題も、質量に大きく影響を受けている可能性がある。

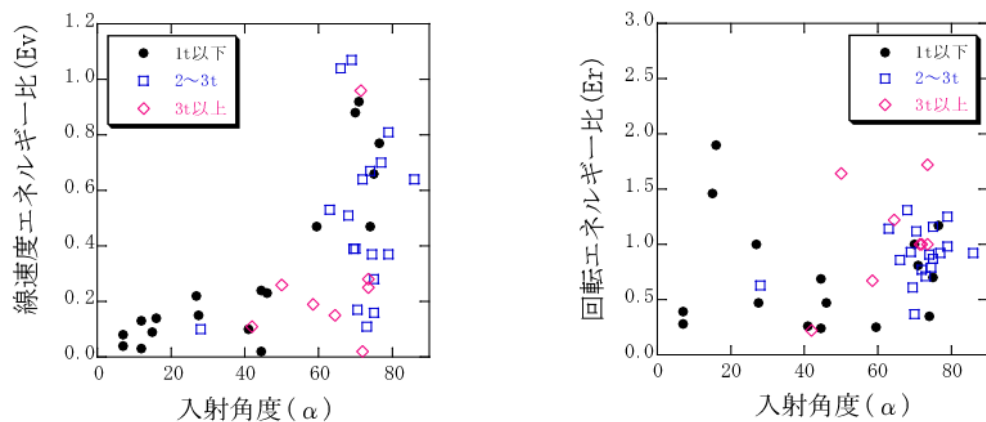


図 4.2.4.8 線速度エネルギー比と回転エネルギー比の入射角度との関係(質量別)

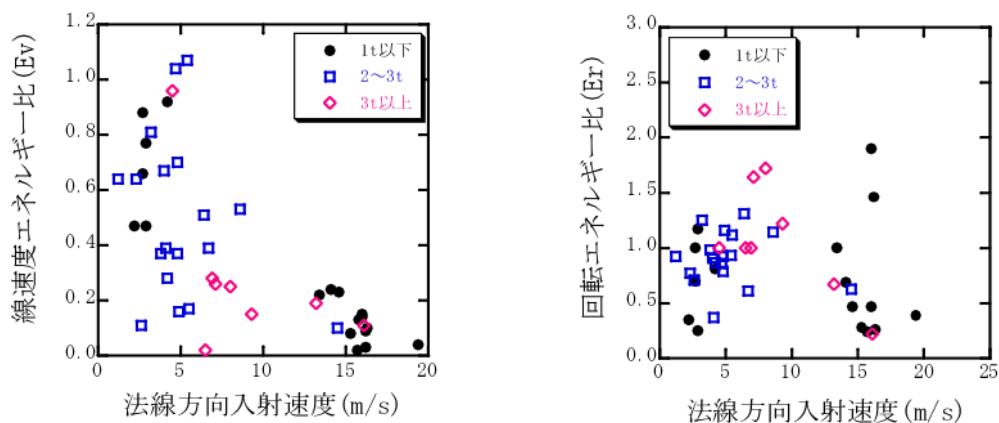


図 4.2.4.9 線速度エネルギー比と回転エネルギー比の法線方向入射速度との関係(質量別)

(4) 線速度エネルギー比と回転エネルギー比

図 4.2.4.10 は、回転エネルギー比と線速度エネルギー比との関係を示した図である。

A グループ、すなわち入射角度が小さい方が回転エネルギー比の変化は少なく、B グループ、すなわち入射角度が大きい方が回転エネルギー比の変化幅が大きい。回転エネルギー比の分布は、線速度エネルギー比が最大($Er=1.0$)のときを 1.0 とし、線速度エネルギー比が低下するにしたがい 0.0~2.0 との間に分布するようになる。回転エネルギー比が 1.0 を超えるのは、衝突時の岩塊の姿勢などによって線速度エネルギー比の一部が回転エネルギーに変換されるためと考えられる。

一方、図 4.2.4.11 は、入射角度と回転エネルギー比との関係を示した図である。入射角度が小さいと 1.0 以下だが、大きくなると回転エネルギー比は広範囲に分布する傾向を持つようである。

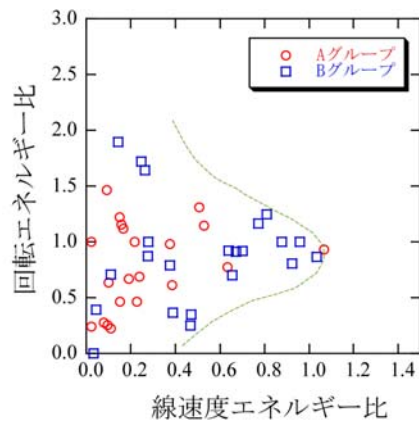


図 4.2.4.10 回転と線速度エネルギー比の関係

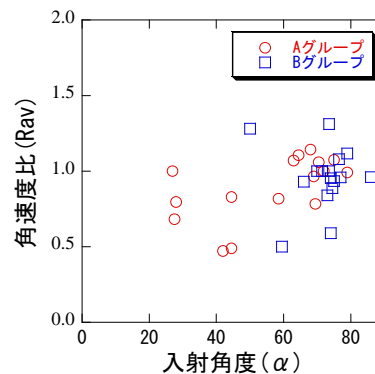


図 4.2.4.11 入射角度と角速度比との関係

以上の結果から、回転エネルギー比は、線速度エネルギー比が大きいときには 1.0 付近の値を持つが、線速度エネルギー比が低下するにしたがい 0～2.0 の間でばらつくようになること、また、入射角度が大きい領域では 1.0 付近に集中することなどがわかる。

本結果から、DDA の入力値となる回転エネルギー比は、入射角度が 60° 以上の斜面(つまり平均斜度が $35\sim40^\circ$ の斜面)なら、大略 1.0 として良いと考えられる。

4.2.9 実験結果のまとめ

3 箇所の現場で、衝突時の入射角度と入射速度の計測を行い、主に速度比の特性について調べた。

観察結果は、入射角度の違いに着目し、入射角度の小さい A グループと、入射角度の大きい B グループとに分けて論じた。以下、結果をまとめる。

＜法線方向速度比と速度エネルギー比の性質＞

法線方向速度比と速度エネルギー比には、入射角度が大きくなるにしたがい値は増加する。同様にして、法線方向速度比と速度エネルギー比は、法線方向入射速度が速くなるにしたがい値は減少する。

このような現象は、落下途中に大きな地形変換点をもつ現場(a)(b)において特に顕著であった。また、現場(c)のように同じような入射角度の場合には、入射角度と法線方向速度比の関係は逆転する場合もあることがわかった。この時、速度エネルギー比と入射角度との関係は前述のとおりであり、観察結果も合わせて考えると、法線方向速度比の変動には反

射角度も大きく影響していることがわかる。本来、反射角度の影響は、衝突地点の地盤の凹み(圧縮変形、塑性変形)と衝突後の岩塊の姿勢変化によって生じるものと考えられる。本実験結果からは、速度エネルギー比も法線方向速度比もともに、入射角度の大きい領域でも広くばらついており、この結果からみる限り、本実験では前者(地盤の凹み)の影響が予想以上に大きかった可能性が推察される。

＜衝突時の線速度比と角速度比＞

衝突時の角速度比の変化は、入射角度が小さい場合に比べて、入射角度が大きい場合の方が変化は大きい。また、線速度比が基本的に 0～1 の間で変動するのに対し、角速度比は、1.0 付近を中心に 0～1.3 の幅で変動する。(計測の限界により最大が 1.3 にとどまったが、実際には 2.0 以上のなる場合も多いと想定される)。ただし、速度比のように、角速度比には現在のところ法線方向入射速度との関係に顕著な関係は認められない。

＜線速度エネルギーと回転エネルギーの落下中の変化＞

現場(c)において、落下開始から終点までの速度と回転エネルギーの変化を求めた。その結果、落下時のエネルギーの変化は速度の増減、すなわち線速度エネルギーを主体として変動するが、対する回転エネルギーの変化は小さくほぼ一定に近いことが明らかとなった。この結果は、右城らが報告している観察結果とも一致する。しかし、この結果を線速度エネルギーと回転エネルギーの比という視点でみると、斜面のどこでも常に一定という訳ではなく、斜面の場所、卓越運動の種類などによって相対的に変化するものであることがわかる。このことは、また落石運動が終わりに近づき、速度が低下してくると相対的に回転エネルギーの割合が増加することも意味している。一般に、対策計画時には回転エネルギーの線速度エネルギーに対する比率を一律 10%として設計されるが、斜面の下方に計画されることが多い対策計画では、この点に対する注意も必要となることがわかる。この傾向は、規模の大きい岩塊ほど顕著なようである。

4.3 室内落石実験

4.3.1 室内実験の目的と着目点

落石シミュレーションでは、通常、飛行(落下)、衝突、回転、滑動などの挙動が扱われる。なかでも衝突は、軌跡や速度、到達距離など、結果に与える影響が大きい。この衝突時の係数に、法線方向速度比(R_n)や速度エネルギー比などが用いられる。

現場実験では、これらの入射角度や法線方向入射速度に依存する性質があることを確認した。しかし、さまざまな角度と速度で衝突する岩塊の速度比(R_v)の特性を、入射角度や速度の条件が限られ、ばらつきの多い現場実験データのみから詳細に把握することは難しい。このため、速度比(R_v)の詳細な特性だけでなく、その適用性にも課題が残っている。

球体を垂直に落下させ、その跳ね返り高さとの比をとった係数は、反発係数(跳ね返り係数)と呼ばれる。ただし、落石関係の論文では、一般に反発係数を”法線方向速度比(Restitution of Coefficient)”と呼ぶ。本論文でも、以後”法線方向速度比”もしくは” R_n ”と呼ぶ。図 4.3.1.1 は、傾斜衝突実験に先立って行った、水平な反射板の上に球体を垂直に自由落下させたときの反発係数の変化を求めた実験の図である。実験は、地面に水平に置いた厚さ 5cm の花崗岩の板の上に、高さ 1m, 2m, 3m, 5m の高さから、直径 3cm の鉄球、アルミ球、木球(ブナ材)と、直径 5.8cm の石英球を落下させて反発係数を測定した。入射速度は、落下高さから $v = \sqrt{2gh}$ により換算している。

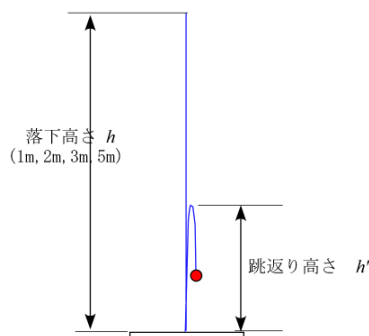


図 4.3.1.1 垂直落下実験概要図

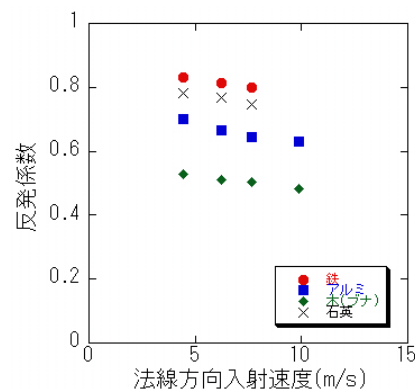


図 4.3.1.2 垂直落下実験結果[27]

これまでの研究によって、法線方向速度比(R_n)は衝突する材料によって変化することが知られている。本実験結果でも、鉄球、石英球、アルミ球、そしてブナ球と、衝突物質の硬さが相対的に柔らかくなるにつれて法線方向速度比は低下する傾向がみられる。落石シミュレーション、特に質点系の解析において用いられる法線方向速度比(R_n)が、しばしば崖錘や岩盤といった材質別の代表値として挙げられているのは、法線方向速度比のこのような性質に着目したことによるものである。

一方、図 4.3.1.2 からは、法線方向速度比(R_n)が入射速度が増すにつれて低下する様子

がわかる．これが，法線方向速度比(R_n)の速度依存性と呼ばれる性質である．このように，入射速度が増加するにつれて法線方向速度比(R_n)が低下する現象については多くの研究があり，既にいくつかの質点系の落石シミュレーションでは考慮されている．落石対策便覧参考資料では，速度依存性を考慮するか否かは，シミュレーションの結果(速度や軌跡)に大きく影響すると述べられている．しかし，この特性も，衝突角度が変化した場合にどのように変動するのかという点になると，明確でない部分が多い．室内実験は，このような傾斜衝突に関する系統的な速度比の変化を調べることが目的である．

4.3.2 傾斜衝突実験

(1) 実験の方法

本実験では，アルミや木や石英など形状と質量の明らかな球体を，傾斜した反射板上に高さを変えて落下させ，衝突時の速度と軌跡を計測した．反射板は，花崗岩板と合板で作成した．落下高さは1m,2m,3m,5mの4種類，反射板は 15° ， 30° ， 45° ， 55° ， 65° ， 75° の6種類であり，実験はこれらを組み合わせて行った．

図4.3.2.1は，実験の概要図である．反射板は，幅40cm，高さ90cm，厚さ2mmの鉄枠内に設置した．これまでの室内実験の多くが落下高さを1m前後としているのに対し，本実験では最大落下高さを5mとしている．このような高さから，石英球や鉄球のような質量の大きい球体を落下させると，反射板を固定している鉄枠自体が反動によって瞬間的に動く．このため，鉄枠自体はアンカーで固定されている．

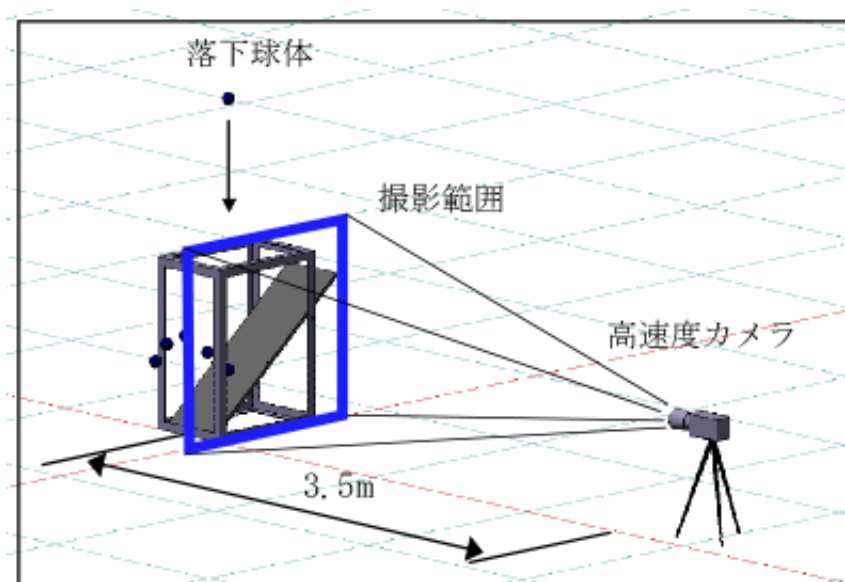


図 4.3.2.1 傾斜衝突実験の概要図

実験に用いた球体は、直径 3cm から約 6cm のアルミ、石英、木(ブナ材)の球体である(図 4.3.2.2)。一方、使用した反射板は、厚さ 2cm の合板を 3 枚貼り合わせて計 6cm 厚とした 0.3m×0.9m の木製反射板と、厚さ 2cm の合板を 2 枚貼り合わせた合板上に厚さ 5cm、0.3m×0.6m の花崗岩板を載せた反射板(花崗岩板)の 2 種類である。圧縮強度は岩製反射板で $\sigma = 149\text{N/mm}^2$ 、木製反射板で $\sigma = 36\text{N/mm}^2$ である。

実験は、反射板の角度と落下高さを変化させて、それぞれの場合の入射角度と速度の変化を観察した。なお、投下は手で行った。表 4.3.2.1 に、実験に用いた球体の緒言を示す。

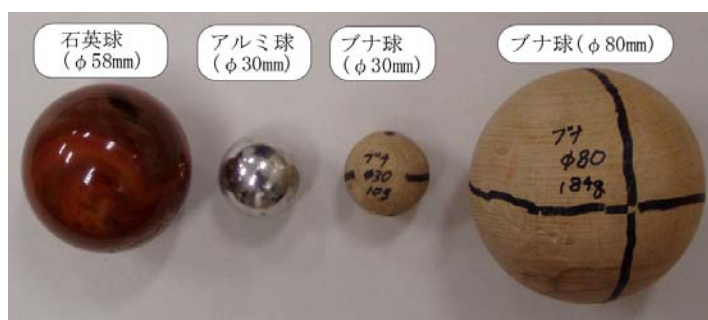


図 4.3.2.2 実験に用いた球体

表 4.3.2.1 実験に用いた球体の緒言

種 類	直 径(mm)	密度(g/cm ³)	弾性係数(kPa)
アルミ球	30	2.69	7000
ブナ球	30	0.6	1.4
ブナ球	80	0.6	1.4
石英球	58	2.6	—

(2) 計測の方法

衝突実験において係数を測定するための方法には以下の 2 つがある。

- 1) 軌跡(高さと到達距離)から計測する方法。
- 2) 衝突点での速度を直接計測する方法。

軌跡を計測する方法は、図 4.3.2.3 に示したように反射後の軌跡の最高点から求める方法である。一般に、ビデオカメラの撮影では、目標物が小さく速度が速いほど画像が流れるため読み取りが難しいが、この方法では市販のビデオカメラでも容易に結果が得られる。ただし、入射速度が大きくなると跳ね返り距離も大きくなるため観察範囲を広くとらなければならない。この反射軌跡の制約により、室内実験としては、落下高さ 2m 程度が限界といえる。

一方、衝突点での入反射速度を直接計測する方法は、ビデオカメラの性能(撮影速度)に大きく左右される。例えば、飛翔体が 3~6cm と小さく撮影範囲が 1.5m 四方程度の場合、落下速度が 4m/sec を超えると、落下球体が画面範囲にとどまる時間は 3/30sec 程度に過ぎなくなる。このため、市販のビデオカメラ(1/30sec)では画像が流れて不鮮明となり、正確な衝突接地点を割り出すことが難しい。本実験では、傾斜した反射板における入反射時の係数測定を目的としているため、反射板が高角度になるほど市販のビデオカメラでの測定が困難になる。そこで、本実験では図 4.3.2.4 に示したハイスピードデジタルイメージングカメラ(PhantomV4.2)による 2)の方法による計測を採用した。撮影速度は使用機種最大の 1/1900 秒であり、平均撮影時間は約 1 秒である。この撮影記録をもとに、衝突前後の入反射角度と速度を求め、その結果を基に、法線方向速度比、接線方向速度比、速度エネルギー比などを求めた。

計測では、入射時の速度と角度を求めることは容易である。入射速度は、落下高さを計測することで理論速度と対比できる。また、入射角度は反射板の角度から求められる。これに対し、法線方向速度比や接線方向速度比に必要な反射角度の計測にはいささか注意が必要となる。これは、反射角度が時間の経過とともに変化するためである。この影響は、反射板の角度が低角度になるほど大きい。しかし、今のところ角度の求め方に対する決まりはない。このため、本論文では反射時の測定方法を以下のように定義した。

反射角度・・・衝突地点から 1/30sec 後の位置と衝突地点間の角度。

反射速度・・・衝突地点と 1/30sec 後の位置間の速度。

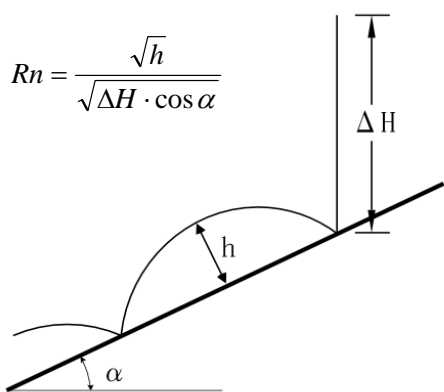


図 4.3.2.3 軌跡から求める方法

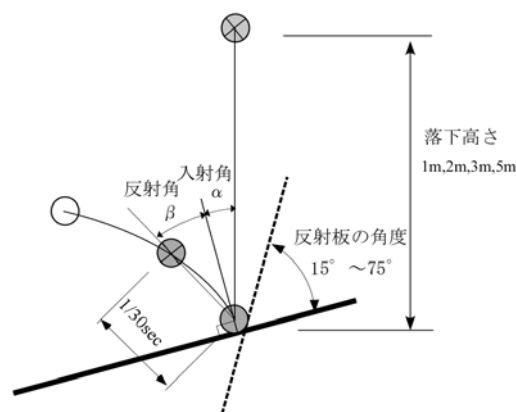


図 4.3.2.4 速度から求める方法

なお、実験では、石英球や鉄球を 3~5m の高さから落下させると、木製反射板には衝突箇所凹み(衝突痕)ができる。また、ブナ球やアルミ球を硬い花崗岩の反射板上に落下させると、球体にはわずかな凹みや傷がつくことがある。また、傷がつかないまでも、木製

反射板では衝突時にたわんだり、わずかに振動する様子が撮影画像に捉えられていることがある。本来、このような条件は、衝突材質の正確な物理定数を求めるうえでは大きな障害となる。しかし、ここでは傾斜衝突時の軌跡と速度の変化を求めることを目的としているため、このようなわずかな変動については無視した。

4.3.3 実験から得られた軌跡、速度比の特徴

垂直落下実験と同様、跳ね返り高さや法線方向速度比は、落下させる球体や反射板の材質によって大きく変化する。例えば、同じアルミ球を木板と花崗岩板に落とした時とでは、花崗岩板の方が跳ね返り高さは明らかに大きい。同様に、アルミ球とブナ球を、花崗岩板上に落とした場合もそれぞれ跳ね方や異なる。ここでは、まず軌跡の特徴から述べ、次いで各計測値の特徴について述べる。

(1) 傾斜衝突時の軌跡

図 4.3.3.1 は、アルミ球が木製反射板と花崗岩反射板上に衝突したときの反射軌跡の違いを示した図である。反射板の角度が $15\sim 30^\circ$ のように低角のとき、反射板が硬いと高く跳ね上がるため反射角度が小さく、柔らかいと跳ね上がりが低いため反射角度も大きい。このような違いは、例えば 45° の時の軌跡を見比べれば明らかである。すなわち、木製反射板の場合には 45° で既に下向き反射となっているが、花崗岩の場合にはほぼ水平に飛び出している。このように、衝突材質の違いは反射時の軌跡に影響を与える。しかし、本結果からは、反射板の角度が一定なら、入射速度によらず反射角度の変化は小さいことがわかる。ただし、反射板の角度が低角度なほど反射角の幅が広く、反射板の角度が高くなるほど反射角の変化幅は狭くなる傾向はある。そして、入射速度が速いほど反射角は小さい。これが、角度一定下での速度依存の影響である。これらの点からみると、速度依存の影響は、反射板が低角度なほど大きく、高角度になるほど小さくなるといえる。

なお、低角度の反射板では、材質が柔らかいほど入射速度によるばらつきが反射後の軌跡に表れる。このばらつきの原因は、衝突時の滑りや凹み、あるいは衝突時の反射板の振動によるものとみられ、その影響は反射角度に表れる。図 4.3.3.2 は、アルミ球、ブナ球、石英球の入射角と入射角度との関係を示した図である。ここでは、反射板の角度と入射角度との関係を、角度比と呼ぶ。

$$\text{角度比} = \text{反射角度} / \text{入射角度}$$

弾性反発では、反射角度=入射角度となるが、非弾性反発で、入射角度が小さい場合には反射角>入射角の関係となる。したがって角度比も 1.0 を上回るようになる。ただし、アルミ球と石英球の花崗岩盤との反発のように、常に 1.0 に近い値を示す場合もあることか

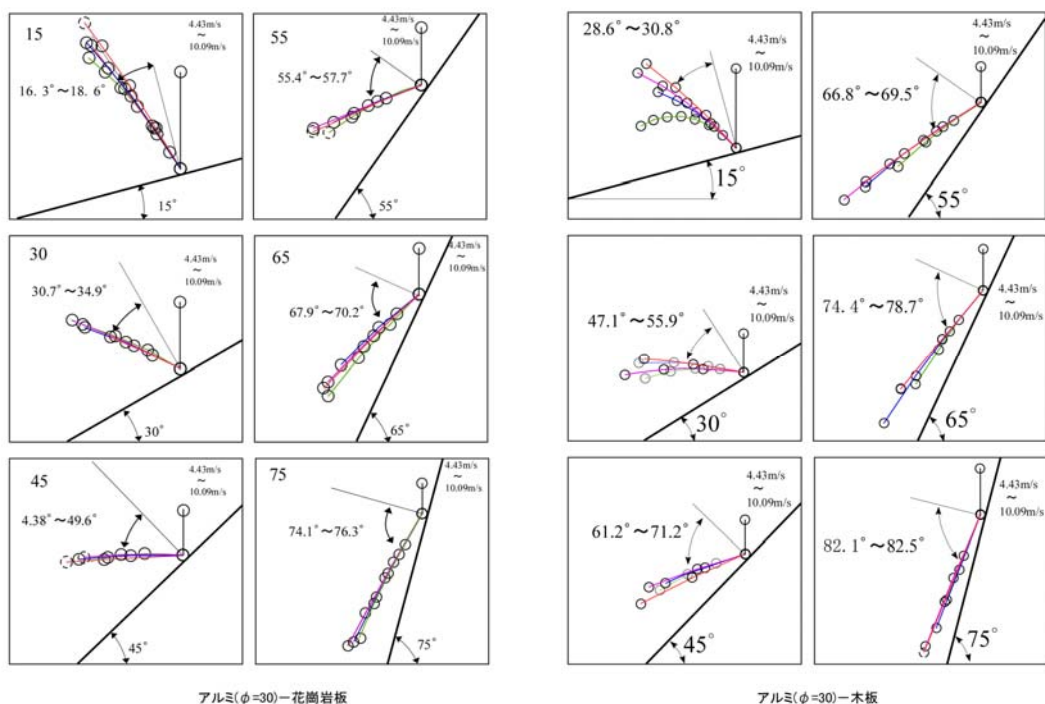


図 4.3.3.1 反射板の材質の違いによるアルミ球の軌跡の違い

ら、この関係は、材質の硬さにもよる。例えば、アルミ球や石英球、それにブナ球の木製反射板における角度比の変化は、入射角度に対してほぼ比例的であり、入射角度が大きいときは反射角 \approx 入射角であるが、入射角度が小さくなるにしたがって反射角 $>$ 入射角の関係が強く現れる。この関係は、衝突する反射板の材質によっても異なり、ブナ球では、ブナ球-岩製反射板、ブナ球-木製反射板、ブナ球(80)-岩製反射板の順に上記のような関係がある。これらの結果から、硬いもの同士の衝突では入射角と反射角はほぼ 1:1 となり、球体と反射板の硬さの差が大きく、入射角度が小さくなるほど反射角度 $>$ 入射角度となることがわかる。

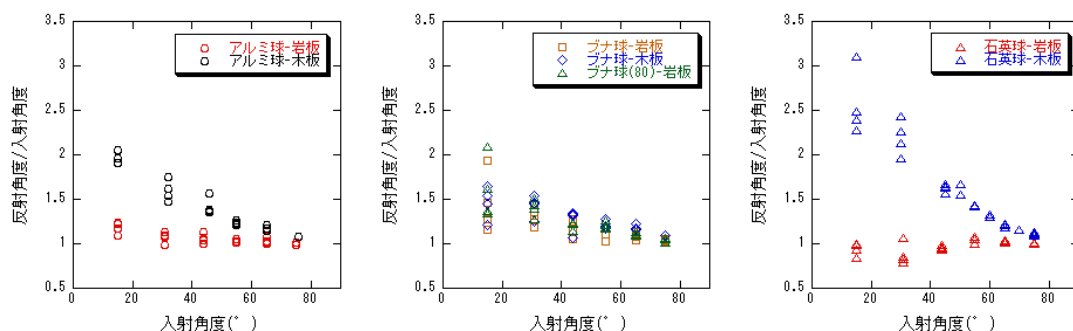
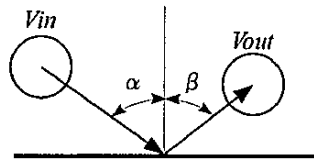


図 4.3.3.2 入射角度に対する角度比の違い

<反発係数と入反射角度>

球体がなめらかな板に，速さ V_{in} ，法線との角度 α の方向から衝突するとき，速度比で定義される反発係数を e とすると，反発する角度 β は式 4.3.1 で表される．



$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{e} \tan \alpha \right) \quad (4.3.1)$$

式 4.3.1 をもとに，石英球の木製反射板と岩製反射板との関係を図化したのが図 4.3.3.3 である．入射角度に対する反射角度は，ほぼ式どおりに行われており，この結果はブナ球，アルミ球でもほぼ同じである．なお，摩擦係数の影響は，入射角度が小さいほど大きい，本実験結果からみる限り，せいぜい数度程度である．むしろ，このような変化の影響には，石英球に生じる傷や，木製反射板の凹み(圧縮塑性変形)の方が大きいと考えられる．

以上の結果からみると，非弾性衝突における反射角度は，入射角度をもとに式(4.3.1)で表すことができる．

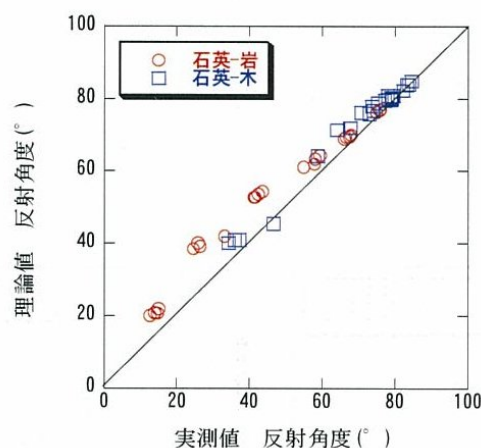


図 4.3.3.3 理論式と実験結果による反射角度の比較

(2) 傾斜衝突時の速度比の入射角度との関係

入射角度と衝突時の係数(R_n, R_t, E_v)との関係を図 4.3.3.4, 図 4.3.3.5, 図 4.3.3.6 に示す. 本図では, 入射角度が小さいことは, 反射板の角度が低角であること, また入射角度が高いことは反射板が高角であることを示している.

入射角度との関係のなかで注目されるのは, 法線方向速度比(R_n)である. ここでは, アルミ球と石英球のように, その分布が花崗岩反射板と木製反射板とで異なるものと, ブナ球のように反射板の違いによらずほぼ同じ範囲に分布するものとに分かれる. これは, 法線方向速度比(R_n)が, 衝突物質の違いによって異なる特性値であるためである. 5.2 で述べた花崗岩盤への垂直落下実験では, アルミ球で 0.65~, 石英球で 0.7~の値が得られている. これに最も近いのが図-7a のアルミ球と図-7c の石英球の入射角度 15° の値である. このことから, 法線方向速度比(R_n)は反射板が水平の場合にほぼ最小値を示し, 反射板の傾斜が増すにつれて大きくなっていくことがわかる.

このような法線方向速度比の性質に対し, 接線方向速度比(R_t)もほぼ同様の動きを示すが, その範囲は $R_t=0.6\sim 1.0$ と小さく, 物質による分布の違いは見られない. この点から, 変動の傾向は速度エネルギーの方に近い. 反射板の角度が低角になるほど値が減少するのは, 法線方向速度比が卓越してくるためと考えられる.

一方, 速度エネルギー比は, アルミ球, ブナ球, 石英球いずれも分布範囲がひろく, 0.1~1.0 の間に分布する. 速度エネルギー比も, 反射板が低角度であるほど衝突時のエネルギー損失が大きく, 高角度になるほど損失は小さくなることを端的に表している. この場合も, 法線方向速度比同様, 入射角度ゼロの場合が, 物質間の最小速度エネルギー比を表していることになる. ただ, 法線方向速度比と異なるのは, 速度エネルギー比は高角度になると 1.0 に近づく点である. これは, 物質によらず, 急な反射板への衝突ではエネルギーロスが最小となることを示している.

このように, 入射角度が大きくなるにつれて, つまり反射板の傾斜が急になるにつれて値も大きくなる現象は, R_n, R_t, E_v のすべてに共通しており, いずれも垂直落下時の値が衝突物質間での最小値を示す. また, このような現象は, Wu や Chau らの実験でも確認されている.

なお, 石英球と木製反射板との関係がやや下に凸の曲線となるのは衝突による木板の凹みと振動による影響とみられ, また, アルミ球・岩板の場合は, 衝突時にアルミ球についた傷が反射時の角度や速度に影響したためと考えられる.

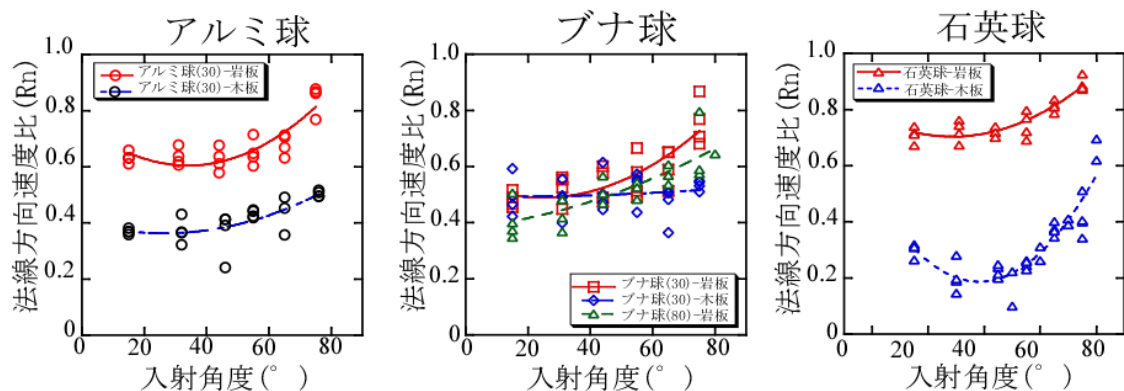


図 4.3.3.4 入射角度と法線方向速度比(R_n)との関係

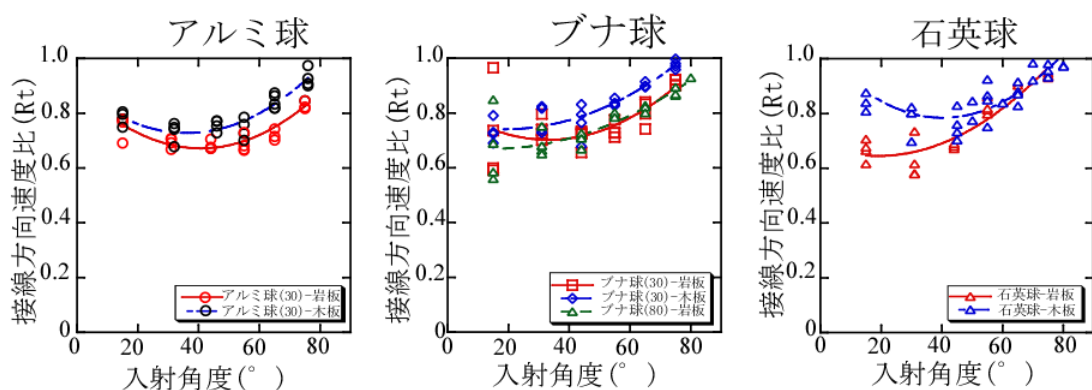


図 4.3.3.5 入射角度と接線方向速度比(R_t)との関係

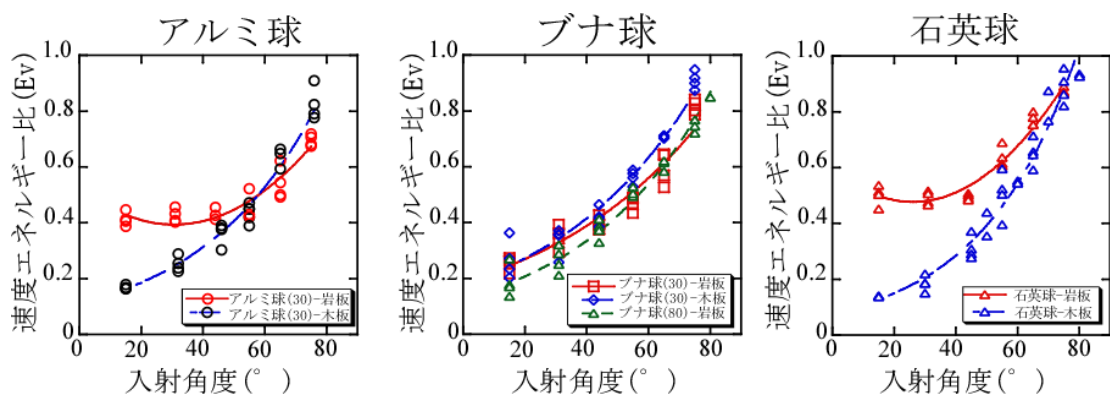


図 4.3.3.6 入射角度と速度エネルギー比(E_v)との関係

(3) 傾斜衝突時の速度比の法線方向入射速度との関係

落石対策便覧の参考資料では、これまでの実験結果をまとめた結果、衝突時の各係数は、法線方向入射速度と大きな関係を持つとしている。本論文でも、各係数を法線方向入射速度との関係で述べる。

法線方向入射速度と衝突時の係数(R_n, R_t, E_v)との関係を図 4.3.3.7, 図 4.3.3.8, 図 4.3.3.9 に示す。本図では、法線方向入射速度が小さいことは反射板の角度が高角であること、また法線方向入射速度が大きいことは反射板が低角であることを示す。

法線方向速度比(R_n)は、入射角度との関係同様、本結果でもアルミ球、石英球は反射板の材質によって明瞭に分かれている。また、ブナ球-木製反射板の場合には、反射板の違いによらない。これは、法線方向速度比(R_n)が、衝突物間の物性によって異なることによるものである。ここでも、前項の入射角度同様、最大法線方向入射速度時の法線方向速度比(R_n)が、最も角度効果の低い垂直衝突時の反発係数に近似する。質点解析では、斜面の構成材質やその状態別に R_n は区分される。しかし、例えば石英球-木製反射板のように、 $R_n=0.2\sim0.7$ まで変化する例もある。このように変化する R_n の、どの値を入力値として採用するかは難しい。

接線方向速度比(R_t)は、値の範囲が $R_t=0.6\sim1.0$ と狭く、法線方向速度比のような物質による分布の違いはみられない。入射角度の影響と同様、反射板が低角度になるほど値が小さくなるのは、反射板の傾斜がゆるくなるほど法線方向速度比が卓越してくるためと考えられる。

速度エネルギー比(E_v)は、入射角度による影響と同様、アルミ球、ブナ球、石英球ともに法線方向速度比が小さくなるほど 1.0 に近づき、それ以後速度の増加にしたがって低くなる。法線方向速度比(R_n)と異なり、物質による分布の違いは見られず、逆にどれも変化の幅が広いことが特徴である。ただし、アルミ球や石英球-花崗岩反射板のように、硬い材質への衝突では最小値が 0.4 前後、また木製反射板のように相対的に軟らかい材質への衝突では 0.1 と、材質の影響は、最大法線方向入射速度時の最小値に表れる。

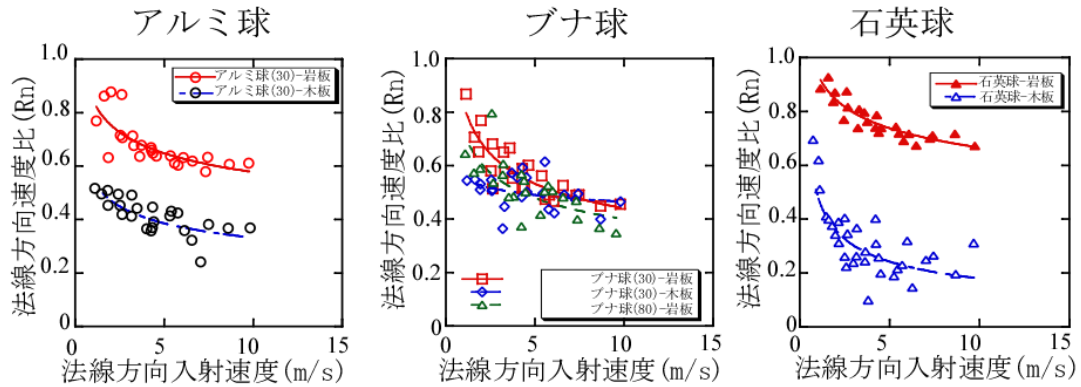


図 4.3.3.7 法線方向入射速度と法線方向速度比(R_n)との関係

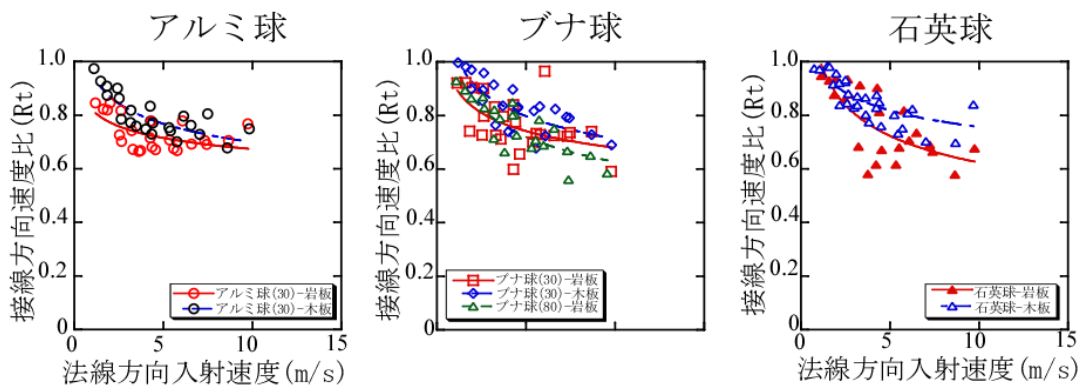


図 4.3.3.8 法線方向入射速度と接線方向速度比(R_t)との関係

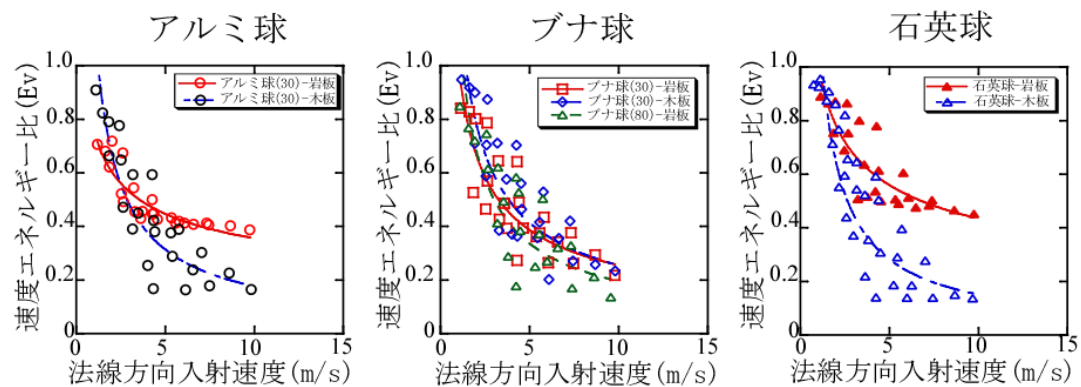


図 4.3.3.9 法線方向入射速度と速度エネルギー比(E_v)との関係

4.3.4 法線方向速度比(R_n)と速度比(R_v)の法線方向入射速度に対する性質

実験結果から、法線方向速度比(R_n)、接線方向速度比(R_t)、速度エネルギー比(E_v)は、入射角度の増加にしたがって値が大きくなり、法線方向入射速度が増加すると値は小さくなることがわかった。ところで、速度エネルギー比(E_v)は、通常は直接計測する訳ではなく、速度自乗比すなわち速度比(R_v)として計測される。このため、ここでは法線方向速度比(R_n)と速度比(R_v)と対比しながらその関係について述べる。

図 4.3.4.1 および図 4.3.4.2 は、石英球と木製および岩製反射板との実験結果、また、図 4.3.4.3 および図 4.3.4.4 には、アルミ球と木製および岩製反射板との実験結果の法線方向速度比(R_n)、速度比(R_v)と、法線方向入射速度との関係を示した。図中では、入射角度毎に記号を変えて示している。

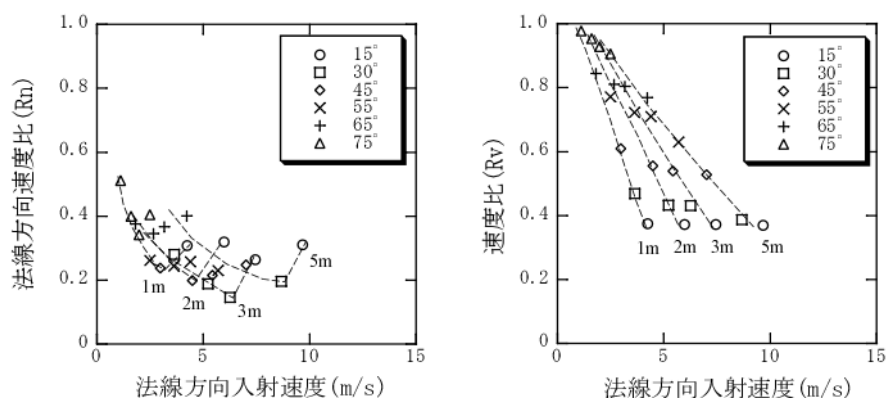


図 4.3.4.1 石英球と木製反射板の傾斜衝突実験結果(左 : R_n , 右 : R_v)[23]

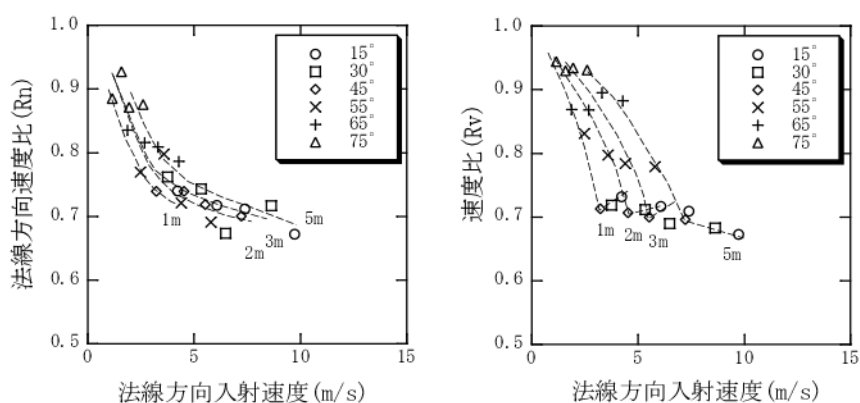


図 4.3.4.2 石英球と岩製反射板の傾斜衝突実験結果(左 : R_n , 右 : R_v)

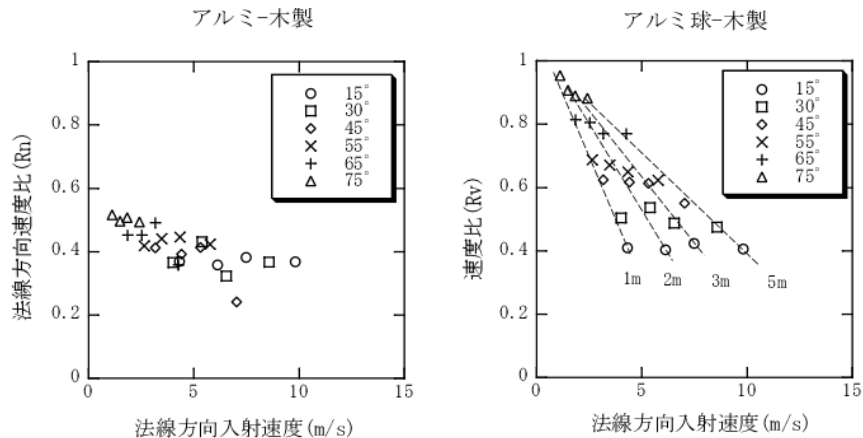


図 4.3.4.3 アルミ球と木製反射板の傾斜衝突実験結果(左 : R_n , 右 : R_v)

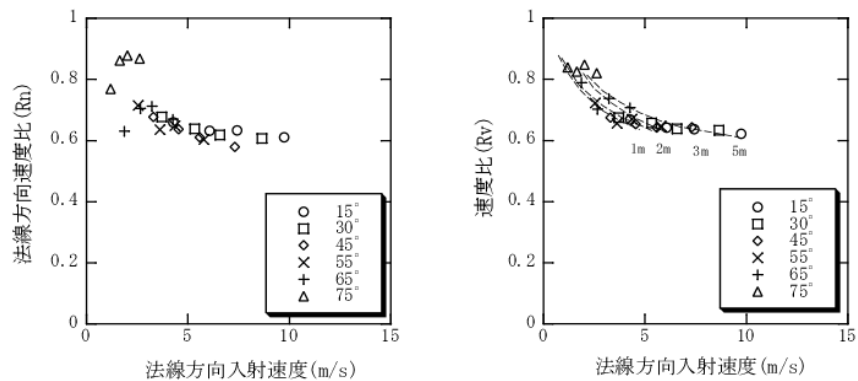


図 4.3.4.4 アルミ球と岩製反射板の傾斜衝突実験結果(左 : R_n , 右 : R_v)

結果に共通しているのは、法線方向速度比(R_n),速度比(R_v)ともに、入射角度が大きいほど値が大きく、入射角度が小さくなるにつれて値も低下するという点である。ただし、図 4.3.4.1 と図 4.3.4.2,あるいは図 4.3.4.3 の速度比(R_v)にみるように、入射角度が一定の場合には速度比(R_v)の変動はそれほど大きくない。このことから、軌跡のところで述べたように、速度比(R_v)には入射角度そのものに大きく依存する性質があることがわかる。また、入射角度が同じ場合にも、法線方向入射速度の増加にともない、その値は減少する。しかし、その影響は、入射角度による変化に比べれば小さい。

一方、速度比(R_v)が、反射板が岩製、木製のいずれでも $R_v=1.0$ 付近を起点とするのに対し、法線方向速度比(R_n)は、木製反射板では石英球、アルミ球ともに 0.5 付近まで起点が下がる。これは、法線方向速度比(R_n)が、衝突物質同士の材質の違いを反映するためと考えられる。これに対し、速度比(R_v)は、材質によらず 1.0 に近い値をとる。このような性質の違いを反映し、法線方向速度比(R_n)は、法線方向入射速度の増加に対して幅の狭い

帯状の範囲にプロットされる。この帯状曲線の分布形状は、入射角度による依存性によって決まるが、帯の幅(すなわちばらつき)は、同一入射角度内での速度依存や入反射時の異常(凹み)によって決まる。このため、入射速度に対する反射速度の傾向が、塑性的な変形(凹み)などの影響によって乱されると、値が大きくばらつく。本実験結果では、主に石英球やアルミ球などの硬い球と、木製反射板のようにやや軟らかい材質との衝突において大きくばらつき、逆にブナ球と木製反射板との間でのばらつきは小さい。

このようにして、値の上限と分布の形状は決まるが、下限となると少々複雑である。 R_n, R_v ともに、入射角度が最小のとき、すなわち垂直落下時の値が下限値となることは明らかである。しかし、反射板が花崗岩のように硬い場合には、ある入射角度以下では、速度比はほぼ一定値を持つようになり、一方 R_n では、その曲線が途中折れ曲がる。この原因は、垂直落下試験にみられた現象同様、入射角が 45° 以下になりエネルギー損失がある範囲を超えると R_n, R_v ともに一定値に収束するためではないかと考えられる。

一方、図 4.3.4.1、図 4.3.4.3 の木製反射板の場合は、花崗岩とは少し様子が異なる。例えば、石英球-木製反射板の場合、入射角度 30° 付近までは速度比(R_v)が比較的きれいに線形的に低下するのに対し、 R_n では大きくばらつく。ばらつきの原因は、反射板の傾斜が 45° 以下の範囲では、衝突時の圧縮塑性変形の影響が大きくなるためと見られる。特に、本実験では、落下高さ 5m のラインが他の速度ラインから離れ、しかも R_n が大きな値をとる。

以上、本実験結果から、速度比(R_v)の上限は材質によらずほぼ 1.0 付近となるが、下限は衝突材質同士の硬さや、球体や反射板自体の変形などの影響によって決定される。また、 R_n の分布の上限は、反射板の傾斜が高角度のときの入反射角度の比によって決まり、下限は反射板の傾斜が低角度のときの、入反射角度の比で決まること、さらに法線方向速度比(R_n)と速度比(R_v)の上下限間の分布は、主に入射角度により変化するなどのことが明らかとなった。

4.3.5 室内落石実験結果のまとめ

本実験から明らかとなった各係数の特徴は、次のようにまとめられる。

<法線方向速度比(R_n)>

- ① 法線方向速度比(R_n)は、球体と反射板の材質(主に硬さ)によって分布が異なる。
- ② 法線方向入射速度が増加するほど、法線方向速度比(R_n)は減少する。

特に、②は反射板の角度が低角になるほど垂直落下時の反発係数に近づくためである。逆に、反射板角度が高角になるほど角度や速度の影響が小さくなるため、法線方向入射速度が低くなると R_n は高い値を示すようになる。

＜接線方向速度比(R_t)＞

① R_t は、球体と反射板の材質によらず分布がほぼ同じであり、1.0～0.6を示す。

②法線方向入射速度が増加するほど、接線方向速度比(R_t)は減少する。

これは、法線方向入射速度が低いほど、つまり反射板が高角度であるほど1.0に近づき、逆に法線方向入射速度が増加すると、つまり反射板が低角度になるほど低下することを意味する。

一方、入射角度の増加にしたがって R_n, R_t が大きくなるのは、反射板の角度が高角度になり角度と速度の差が小さくなるためと考えられる。逆に、入射角度が小さい場合に R_n, R_t ともに小さくなるのは、反射板の角度が低角度になると、入射角度と速度の差の影響が大きくなるためと考えられる。この影響の程度は材質によって異なり、その影響は、 R_n に大きく表れるが、 R_t への影響は小さい。しかし、 R_n を用いる場合には、 R_t も同時に考慮する必要がある。

＜速度比(R_v)＞

速度比(R_v)は、入射角度が大きくなるほど(90°)に近いほど1.0に近く、入射角度が 0° に近づく小さくなるほど小さい。その分布範囲は反射板の材質が硬いと狭く、軟らかいほど広く小さな値となる。

法線方向入射速度に対しても同様で、法線方向速度比が大きくなるほど、速度比(R_v)は小さくなる。なお、法線方向入射速度が大きいということは、入射角度が小さいことを意味する。

以上のように、法線方向速度比(R_n)が物質によってある特定の範囲に分布するのと異なり、速度比(R_v)の変化はほぼ1.0付近を上限として、下限が0.4～0.1まで連続的に変化する。このような性質をみる限り、 R_n は材質別の定数として扱うことは可能だが、 R_v は同様に扱うことはできない。速度比をシミュレーションに用いる際の留意点である。

4.4 実験結果に基づく速度比の特性と評価の方法

4.4.1 現場実験と室内実験の違い

室内および現場実験結果から，落下運動中の線速度エネルギーと回転運動エネルギーの関係や，衝突時の各種速度比の入射角度や速度に対する応答が明らかとなった．しかし，室内実験では明瞭に見えた傾向も，現場実験結果と比較すると必ずしも明瞭ではない．図4.4.1.1と図4.4.1.2は， R_n と R_v の入射角度に対する室内と現場での計測結果を示した図である．室内実験では見えた R_n の材質別の分布傾向や， R_v の材質によらない分布の傾向を，現場実験から読み取ることが難しいことがわかる．両者を比較して共通しているのは R_n, R_v ともに入射角度が小さいと値が低いこと，異なる点は R_n, R_v ともに入射角度が大きいほど実現場では大きくばらつくようになり，実験結果の特徴が失われることである．この傾向は，法線方向入射速度との関係でも変わらない．

このようなばらつきの原因には，岩塊の形状と衝突時の姿勢・回転の影響，計測時の斜面傾斜とより小さな起伏との読み取り角度の違いによる影響，衝突時の斜面の凹みによる影響なども考えられる．また，4.2.7(c)で述べたように，岩塊規模(すなわち質量)による違いも考えられる．いずれにせよ，本結果は実現場では入射角度によるばらつきが大きく表れることを示している．

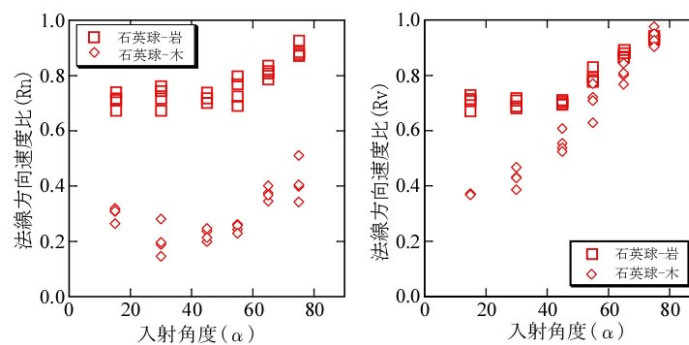


図-4.4.1.1 室内実験にみる R_n, R_v と入射角度との関係[25]

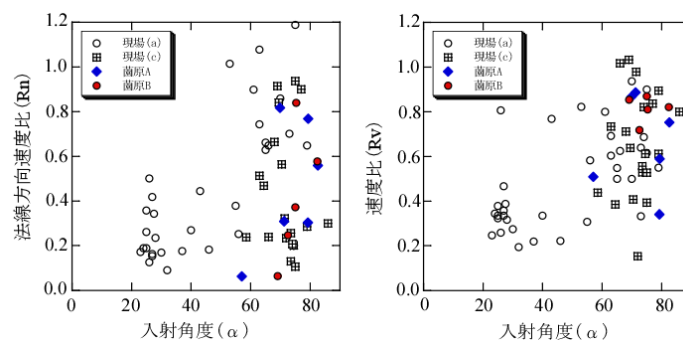


図 4.4.1.2 現場実験にみる R_n, R_v と入射角度との関係[25]

4.4.2 法線方向速度比 (Rn) と法線方向入射速度との関係

実験結果から、落石が斜面で衝突した後の、反発係数あるいは法線方向速度比は、入射時の角度や速度による影響が大きいことが明らかである。

図 4.4.2.1 は、現場(a)と現場(c)のデータにおける Rn と法線方向入射速度との関係である。斜面はいずれも崖錘相当であり、値のばらつきも大きいですが、それでも Rn が法線方向入射速度に応じて変化する様子がみてとれる。図中には、このようなデータの相関をみるために、①～④の 4 つの曲線を示したが、これは以下の式①～④に該当する。

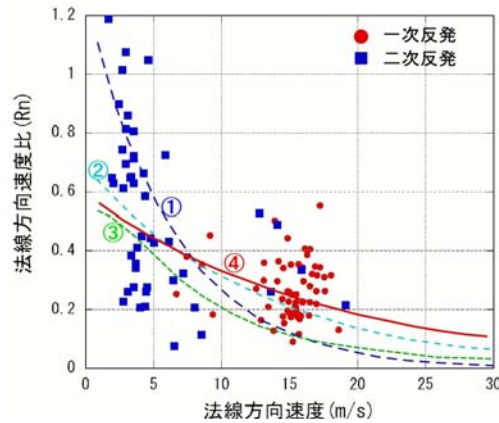


図-4.4.2.1 法線方向入射速度と法線方向速度比(Rn)との関係[26]

$$Rn = 0.593 \exp(-0.058 \cdot Vn) \quad \text{①}$$

$$Rn = 1.25 Rn' \exp(-0.125 Rn' \cdot Vn) \quad \text{②}$$

$$Rn = \frac{Rn'}{1 + \left(\frac{V_{nin}}{K} \right)} \quad \text{③}$$

$$Rn = 1.269 \exp(-0.134 \cdot Vn) \quad \text{④}$$

図中の①曲線(式①)は、落石対策便覧資料(P-269)からの引用であり、高松実験現場から得られた相関式である。②曲線(式②)は、①式を関数化したもので $Rn'=0.55$ のときの曲線である。③曲線(式③)は、Pfeiffer(1989)によるもので、 $Rn'=0.55$ 、 $K=9.144\text{m/s}$ とした曲線である。一方、④曲線(式④)は、図 4.4.2.1 中のプロットデータから求めた指数回帰曲線である。これらの式は、いずれも Rn が法線方向入射速度に依存することを表しており、シミュレーションに導入するうえで、入射速度あるいは法線方向入射速度の関数で表した式②や式③が有効である可能性が高い。ただし、②式のような統計的な相関式は観察する斜面

の特徴によって変化するうえ、室内実験からわかるように R_n 自体は材質によっても変化する。このため、本来であれば斜面の状況毎に準備しなければならないが、このような変化を相関式で表すことは難しい。これに対し、式③のような V_{nin} を関数として R_n や K をパラメータとする関係式であれば、これらの条件によって現場の状況をうまく表現できる可能性がある。

4.4.3 スケールファクター(SF 曲線)を用いた法線方向入射速度依存性の評価

法線方向速度比の法線方向入射速度の依存性を考慮し、法線方向反射速度を求めるために、Pfeiffer らは式(4.4.1)、式(4.4.2)による方法を提案した[27]。式(4.4.2)中の SF は、スケールファクターと呼ばれ、法線方向入射速度による影響を補正する役割をもち、衝突後の法線方向反射速度は、スケールファクターによって補正された $R_n(scaled)$ を用いて式(4.4.1)により求められる。

$$V_{nout} = R_n(scaled) \times V_{nin} \quad 4.4.1$$

$$\text{ただし,} \quad R_n(scaled) = R_n \times SF \quad 4.4.2$$

ここに、 $R_n(scaled)$: 初期法線方向速度比

SF : スケールファクター

$$SF = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{nin}}{K} \right)^2} \quad 4.4.3$$

V_{nin} : 法線方向入射速度(m/s)

K : 9.144m/s

ただし、Pfeiffer らは、本式の背景となったデータを公表していない。このため式の妥当性については不明である。そこで、ここでは実験結果をもとに Pfeiffer らの方法を検証する。

図 4.4.3.1 は、スケールファクター曲線(式(4.4.3))を表した図である。

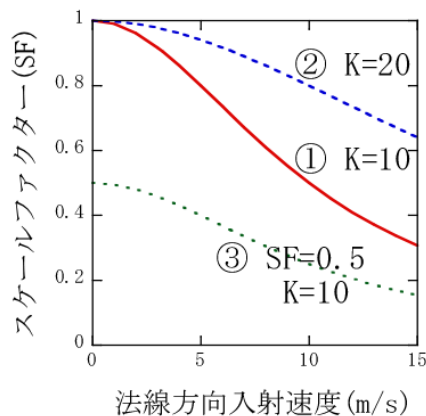


図 4.4.3.1 スケールファクター曲線[19]

本図に示したように, SF 曲線は法線方向入射速度がゼロに近いほど SF が 1.0 に近づき, 法線方向入射速度が増加するにつれて減少する. この傾向は, これまで報告され, また本実験で確認した法線方向速度比(R_n)と法線方向入射速度との関係に近いものである.

実験結果の項で示したように, R_n は基本的に斜面の構成材質別の値であるため, $R_n(\text{scaled})$ と K の値は, 球体と反射板の材質によって別々に決定する必要があると思われる. 図中には, 起点を $SF=0.5$ に変更した場合の曲線③, また K の値を $K=20$ に変更した場合の曲線②も示した.

ちなみに, K の値は法線方向速度比が $R_n(\text{ini})$ の半減値をとるときの速度を示し, Pfeiffer らは 9.144m/s (30feet/sec)としているが, その根拠は示していない. 本論文では, K も含めてその適用性を探る.

なお, Pfeiffer らの方法は, E.Hoek らによっても援用されている. ただし, 後述するように Hoek らは, 法線方向入射速度ではなく, 入射速度そのものの関数としている.

4.4.4 室内実験結果を用いた法線方向速度比の SF 曲線法の評価

(1) Pfeiffer ら方法の検討

図 4.4.4.1 は, 石英球と木製および岩製反射板との実験結果に式(4.4.1)を適用した結果である. 同図の(a)は, R_n と法線方向入射速度との関係を示した図である. 図中には, 石英球・岩製反射板の SF 曲線($R_n(\text{scaled})=0.95$, $K=10\text{m/s}$ と, 石英球・木製反射板の SF 曲線($R_n(\text{scaled})=0.45$, $K=10\text{m/s}$ とを示した. $R_n(\text{scaled})$ は, 実験結果に基づき, 最大入射角度付近の値(図中では法線方向入射速度の最小値)から想定した. 補正速度 K は, 実験結果

を基に、法線方向入射速度の増加に伴う R_n の低下幅を表す．このように考えると、補正速度 K の値は、ほぼ 10m/s 前後の値と考えても良いことになる．

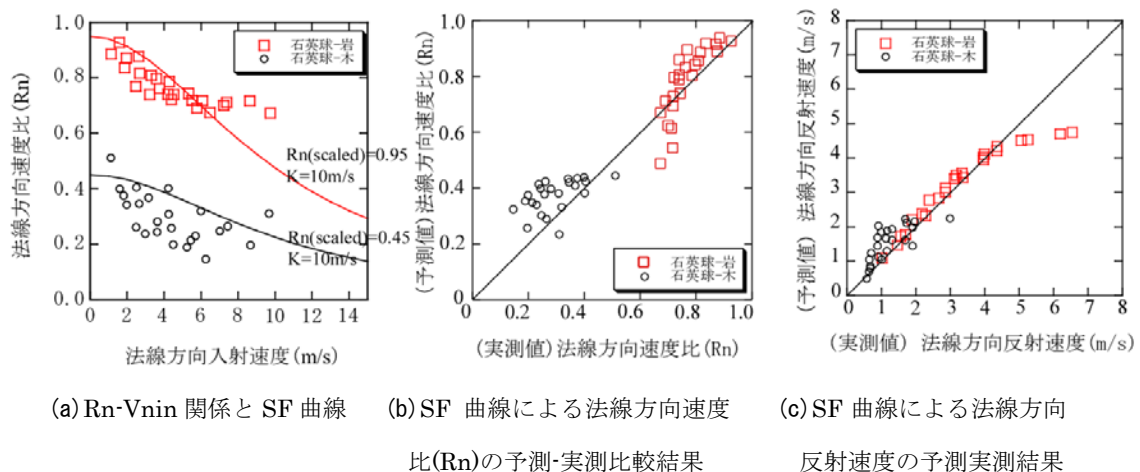


図 4.4.4.1 石英球・岩製・木製反射板の実験結果(R_n - V_{nin})に SF 曲線を用いた
法線方向反射速度の予測結果[25]

一方、図 4.4.4.1 (b) は、この SF 曲線を用いて求めた法線方向速度比(R_n)の、実測と予測値の対比結果である．予測値が、いずれも実測値を上回っているのは、図 4.4.4.1 (a) で SF 曲線を R_n 分布の最大側を通るように設定したためである．図 4.4.4.1 (c) に示した法線方向反射速度の予測・実測結果においても、予測値が実測値を上回るの値が多いのはこのためである．

なお、入射角度が小さい領域でのばらつきは、 R_n の予測値、予測法線方向反射速度にも反映される．この点から、SF 曲線は、図 4.4.4.1 (a) の分布の平均を通る曲線を想定するのがよさそうである．

岩製反射板において、入射角度が小さく法線方向入射速度の速い部分で生じるずれ、すなわち図 4.4.4.1 (a) の SF 曲線の上に飛びだしている部分は、入射角度が 30° 以下で R_n がほぼ一定となる部分である．本検討では処理しなかったが、このような部分の処理には注意が必要である．

以上の結果から、Pfeiffer らが提案したスケールファクター曲線を用いた方法は、実験結果を見る限り、十分に機能を果たすものと推察される．

(2) E, Hoek らの方法

SF 曲線を提案したのは、前述の Pfeiffer らであるが、その後 E.Hoek らは自社(rocscience 社)の質点解析ソフトである RocFall に、SF 曲線を援用した方法を導入している[28]。ただし、Hoek らは、式 4.4.3 中の SF 曲線で、法線方向入射速度(V_{nin})を用いずに入射速度そのものを用いている(式(4.4.6))。前述したように、もし、この式も適用が可能なら、現地でのデータ収集が容易なものとなる。ここでは、この方法の適用性についても検討した。

$$V_{nout} = Rn(scaled) \times V_{nin} \quad 4.4.4$$

$$Rn(scaled) = Rn(ini) \times SF \quad 4.4.5$$

ここに、 $Rn(scaled)$: 初期法線方向速度比

SF : スケールファクター

$$SF = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{in}}{K}\right)^2} \quad 4.4.6$$

図 4.4.4.2(a)は、石英球と岩製および木製反射板の関係を、入射速度と法線方向速度比(Rn)との関係で示したものである。図では、同じ入射速度に対して縦方向に 6 つのデータがプロットされているが、これは法線方向入射速度のように角度の補正がないためであり、図中に記号で示したように下ほど入射角度が小さい。図からは、入射角度が小さいほどばらつき、入射角度が大きいほどばらつきが小さくなることがわかる。このため、例えば入射角度の幅が狭い場合には本式の適用も可能だが、地形の変化が大きく、入射角度の分布幅が大きい場合には、予測と実測のズレも大きくなる。注意しなければならないのは、同じスケールファクターを用いているが、前項の Pfeiffer らの方法とは独立した SF 曲線を求めなければならない、という点である。ここでは、図中に示したように、岩製反射板では $Rv(s)=0.95$, $K=25m/s$, 木製反射板で $Rv(s)=0.45$, $K=15m/s$ とした。図からわかるように、入射速度の勾配に近い K を採用している。一方、図 4.4.4.2(b)は、法線方向速度比(Rn)の予測と実測を対比した図である。角度の補正を無視しているため、 Rn の補正は Pfeiffer の方法に比べると荒さが目立つ。図 4.4.4.2(c)は、法線方向反射速度の、予測・実測図である。1:1 からずれているのは、選定した SF 曲線によるもので、図 4.4.4.2(b)の Rn' も含めて改善の余地はある。ただし、ここで注意しなければならないのは、図 4.4.4.2(a)に示した岩製反射板で入射速度が増すと Rn がほぼ一定になる部分は、本結果からはわからないという点である。このため、一見すると良好に見える図 4.4.4.2(c)の

6m/s 以上の部分値は、実際とは異なるものであることに注意する必要がある。

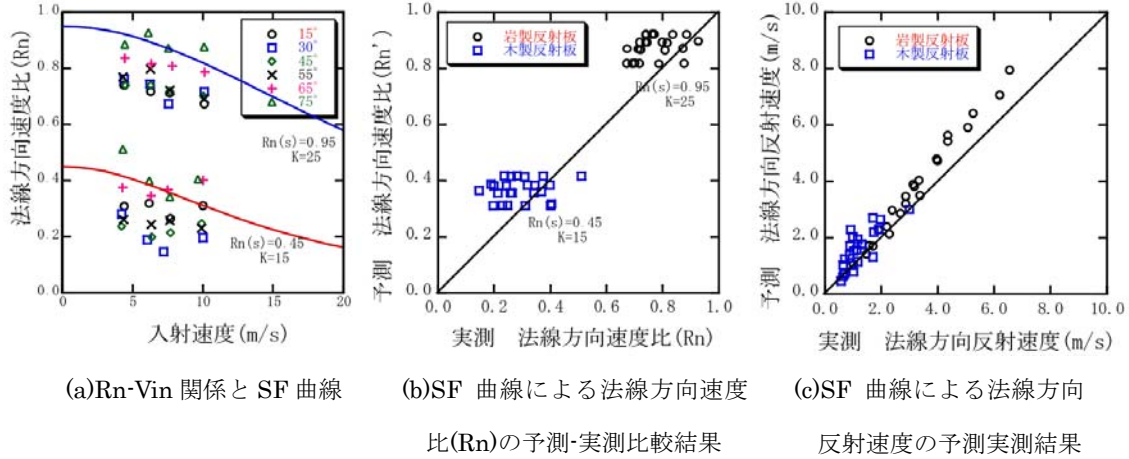


図 4.4.4.2 石英球・岩製・木製反射板の実験結果(Rn-Vnin)に Hoek による SF 曲線を用いた法線方向反射速度の予測結果

4.4.5 速度比(Rv)の法線方向入射速度に対する依存性の定式化

DDA では、速度エネルギー比が速度減衰のための入力値として用いられる。ただし、DDA 内部では速度自乗比、すなわち速度比として扱われている。このため、現行の DDA をそのまま落石問題に適用するためには、本実験から明らかとなった速度比(Rv)の持つ法線方向入射速度依存性を用いるのが早道である。ただし、室内実験で述べたように、速度比は法線方向速度比とは異なり、そのままの形では入力値としては使えない。

一方、実験結果から明らかなように、法線方向速度比(Rn)と速度比(\sqrt{Ev})の法線方向入射速度に対する分布は似ている。そこで、ここでは、Pfeiffer らの方法(SF 曲線法)の援用を試みた。次に、速度比(速度エネルギー比)に用いるための定式化を行う。

速度エネルギー比および速度比は、式(4.4.7)、式(4.4.8)で表される。

$$Ev = \frac{\frac{1}{2}MV_{out}^2}{\frac{1}{2}MV_{in}^2} = \frac{V_{out}^2}{V_{in}^2} \quad 4.4.7$$

$$\sqrt{Ev} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad 4.4.8$$

一方，法線方向速度比は，式(4.4.8)のように表される．

$$Rn = \frac{V_{out} \cos \alpha}{V_{in} \cos \beta} \quad 4.4.9$$

式(4.4.8)は，入射角 β と反射角 α が等しいとき， $\sqrt{Ev} \doteq Rn$ となることを示している．ただし，室内実験から明らかなように，入射角の関係は材質によって，また入射角度によって異なる．しかし，スケールファクターが，入射時の角度と速度を Rn の低減に同時に反映するための補正係数であることは既に述べたとおりであり，多少のズレがあっても使える可能性は高い．

そこで式(4.4.1)と式(4.4.2)の関係を参考に，式(4.4.10)にスケールファクターを導入した．

$$V_{out} = E_v (scaled) \times V_{in} \quad 4.4.10$$

ここに， V_{out} 反射速度

$$E_v (scaled) = \sqrt{E_v} \times SF \quad 4.4.11$$

スケールファクターは，速度比にかかる係数であり，換算速度比(\sqrt{Ev})にかかるものとしている．なお， SF は，法線方向入射速度による式(4.4.3)を用いている．なお，以後，速度比は $Rv(=\sqrt{Ev})$ と表す．

図4.4.5.1は，石英球と，木製および岩製反射板との実験結果に式(5)を適用した結果である．図4.4.5.1(a)は Rv と法線方向入射速度との関係を示している． SF 曲線の起点となる $Rv(scaled)$ は，実験結果からみるとほぼ1.0としてよさそうである．一方，補正速度 K は材質により異なる．ここでは，岩製反射板では $K=12m/s$ ，また木製反射板では $K=7m/s$ とした．

図4.4.5.1(b)は，それらの SF 曲線を用いて求めた速度比(Rv)の実測値と予測値の対比結果である．予測値がいずれもやや過大評価となっているのは，図4.4.5.1(a)で SF 曲線を Rv 分布の最大側を通るように設定したためである．本図からわかるように， SF 曲線を最大速度に合わせて決定すると，入射角度が小さくかつ入射速度が遅いほど， Rv の予測値が過大評価される．この影響は，例えば岩塊が階段状の地形をゆっくり落下するような場合の解析時に，予想以上の反発となって表れる．いわば， Rv による SF 曲線法を適用する際の注

意点である。しかし、入射角度が大きく速度が速い場合への影響は低い。

図4.4.5.1(c)は、反射速度の予測-実測対比結果であり、本図から反射速度の予測は良好に行われていることがわかる。

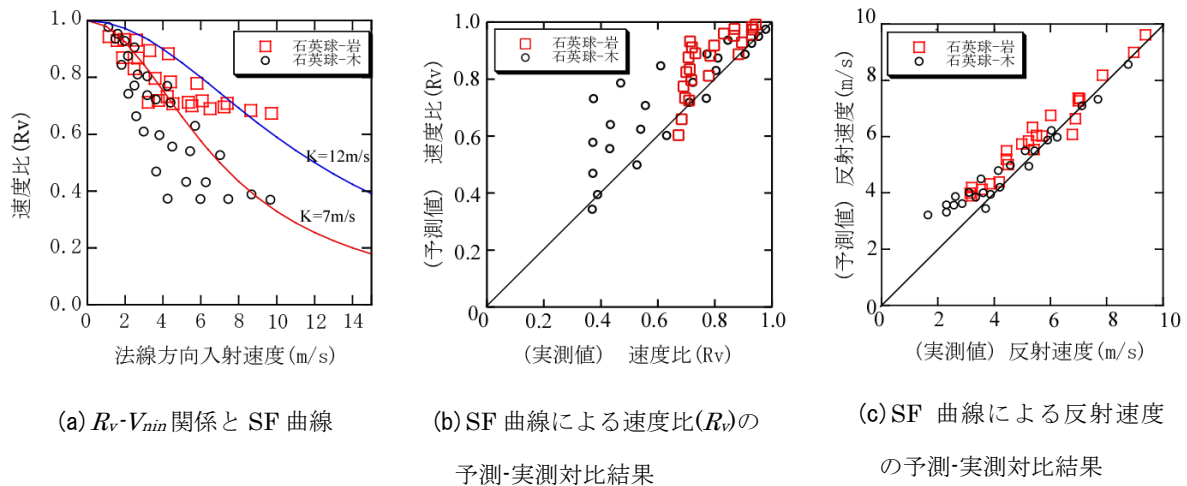


図 4.4.5.1 R_v - V_{nin} 関係に SF 曲線を用いた反射速度の予測[25]

4.4.6 速度比(R_v)を用いた SF 曲線法の実現場への適用性の検討

速度比をに SF 曲線を適用することで、反射速度を予測可能なことが明らかとなった。ここで提案した SF 曲線による方法の、実現場への適用可能性を探る。

(1) 現場 (a) への適用性

本論文における現場(a)に SF 曲線の適用を試みる。4.2 で説明した落差 15~16m の急崖上にあるオーバーハング岩塊の除去現場である。3 章では、通常の入力値の設定方法では、どのようにしても解析困難とした落下途中に大きな地形変換点を持つ現場である。

現場では、図中に示した最初のバウンド(a1)と 2 番目のバウンド(a2)の 2 箇所のデータがある。ここでは、この結果をもと SF 曲線を作成し、SF 曲線法による反射速度の予測を行った。

解析に用いた SF 曲線は、図 4.4.6.1 (a)に示す SF 曲線(1) $R_v(\text{scaled})=1.0$, $K=10\text{m/s}$ と、SF 曲線(2) $R_v(\text{scaled})=1.0$, $K=12\text{m/s}$ の 2 つである。SF 曲線(1)は、a1 地点の平均を通るように、また SF 曲線(2)は、a1,a2 の 2 つの両方の平均を通る曲線である。

この 2 つの曲線による反射速度の予測結果は、図 4.4.6.1 (b)に示すとおりであり、曲線(1)では明らかに予測値が実測値より大きい。図 4.4.6.1 (a)には、分布の最大側を通る SF 曲線($K=13\text{m/s}$)も示したが、この曲線ではさらに予測値が大きくなる。一方、曲線(2)では、

a1 地点では予測値の方が大きく、a2 地点では逆に予測値の方が小さい。このため見かけ上は曲線(1)より、再現性は良好にみえる。

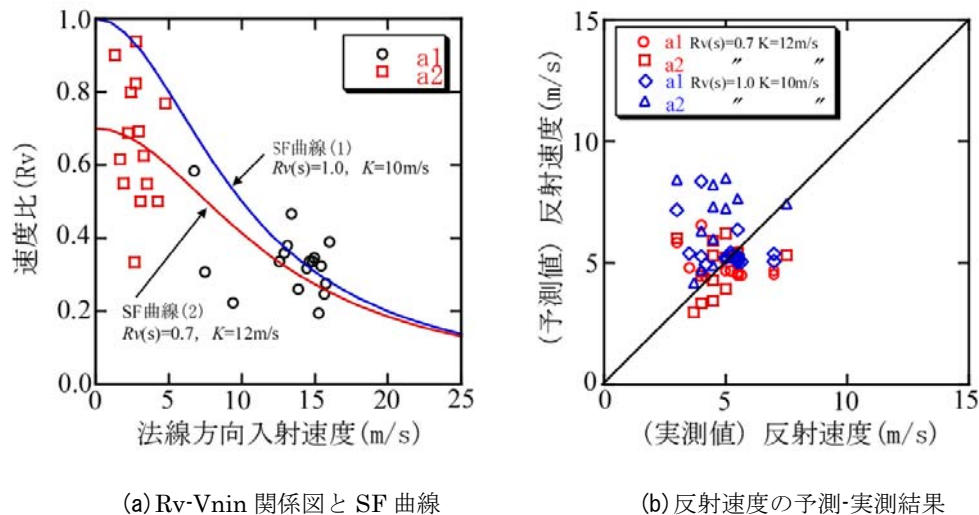


図 4.4.6.1 現場(a) SF 曲線による反射速度の解析結果[25][29][30]

室内実験では、 $R_v(\text{scaled})$ は 1.0 を起点としていたが、実斜面では必ずしも $R_v(\text{scaled})$ は 1.0 とはならないようである。ただし、目標を平均に合わせるか、最大に合わせるかという問題もあり、これらの点は今後の課題である。

(2) 現場 c への適用性

現場(c)は、水平距離 90m、比高差およそ 60m の採石場の斜面である。本現場も、速度比データは、斜面中間部の代表的な反発点(c1,c2 地点)のみである。

速度比の計測地点 c1,c2 は、本斜面における落下岩塊の最大速度区間である。

解析に用いた SF 曲線は、図 4.4.6.2(a)に示す、SF 曲線(1) $R_v(\text{scaled})$ を 1.0、 $K=13\text{m/s}$ と、SF 曲線(2) $R_v(\text{scaled})=1.0$ 、 $K=8\text{m/s}$ の 2 つである。SF 曲線(1)は、速度比分布の最大側を通る曲線であり、SF 曲線(2)は、c1,c2 のほぼ平均を通る曲線である。なお、計測結果中には $R_v=1.0$ 以上の値もみられるが、これを考慮すると SF 曲線の補正速度は $K=18\text{m/s}$ 以上となり、結果に与える影響が大きい。このため、SF 曲線探索時には $R_v=0.95$ 以上の値を無視した。図 4.4.6.2(b)に示す予測結果では、SF 曲線(1)でも予測が実測を大きく上回り、SF 曲線(2)で、ほぼ平均的な予測結果となる。

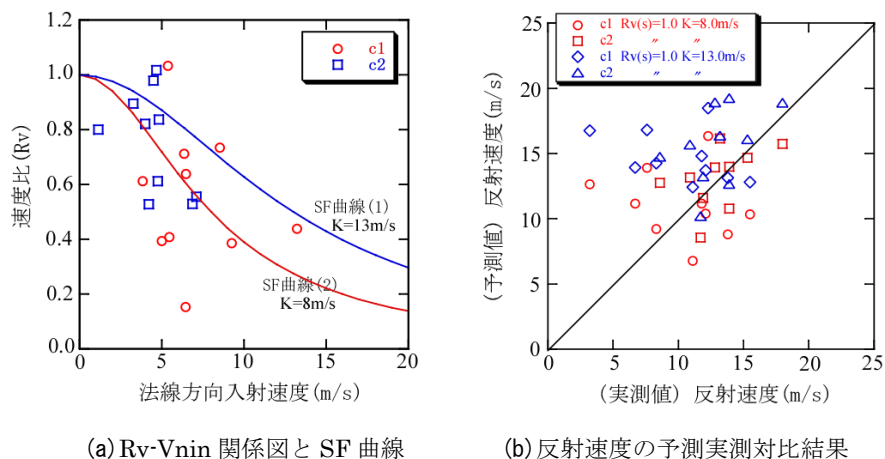


図 4.4.6.2 現場(c) SF 曲線による反射速度の解析結果[25][30]

室内実験では、 $Rv(scaled)$ は 1.0 を起点としており、本事例でも $Rv(scaled)=1.0$ となった。ただし、目標を平均に合わせたためには、補正速度 K を調整する必要がある。

(3) 菌原現場への適用性

本事例は、これまでの実験現場と異なり、文献にて公表された事例である。

旧道路公団は、設計要領に落石防護柵工の設置基準を明文化する目的で、群馬県利根川村大字菌原、利根川水系の上流に位置する「菌原ダム」において落石実験を行った。実験斜面は、以下の写真に示すように、軟岩斜面(A)と、崖錘斜面(B)である。

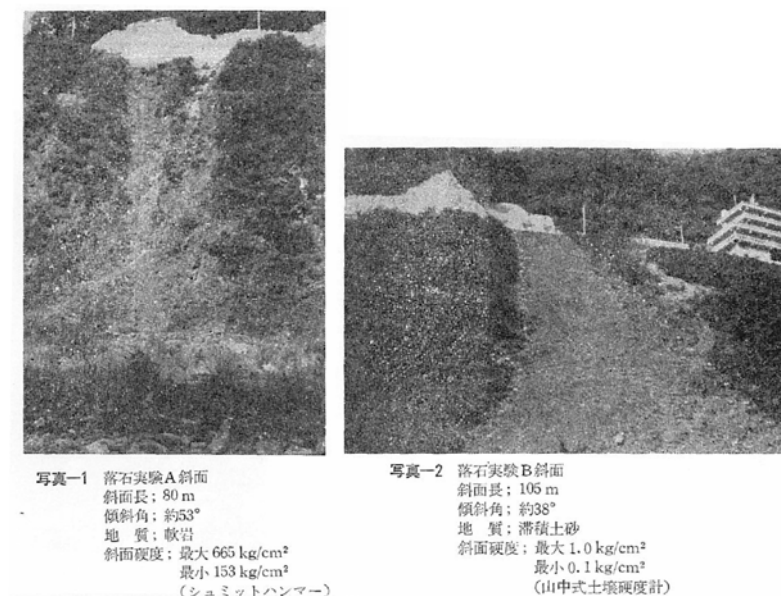


図 4.4.6.3 菌原現場の斜面 A と斜面 B の概要[33]

斜面 A は水平距離 55m, 比高差 70m, 平均傾斜 53° の岩盤斜面である。斜面 B は, 水平距離 90m, 比高差 65m, 平均傾斜 38° の崖錘斜面である。いずれも, 1 ケースだけのデータであるが, 斜面全体わたる衝突点での計測記録があり, 入射角度や速度に対する斜面全体の特徴を含むデータといえる。

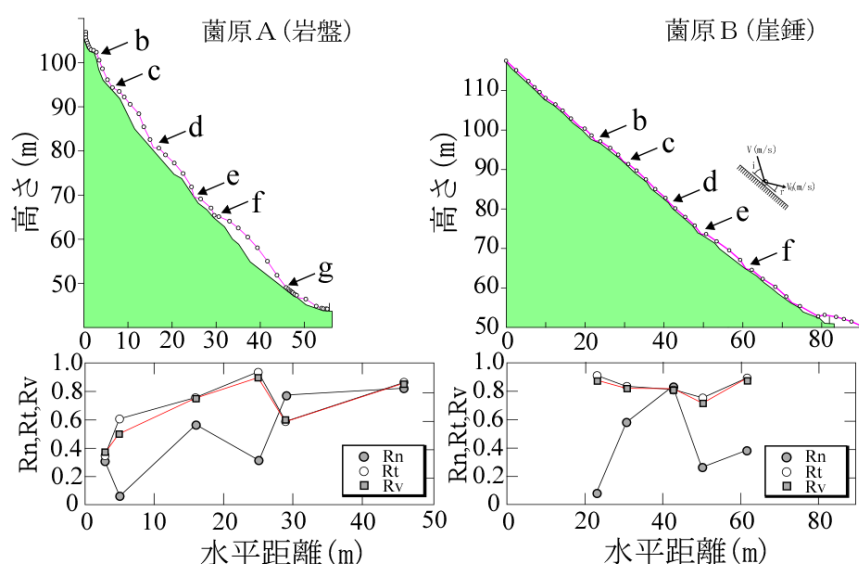


図 4.4.6.4 菌原実験から得られた R_n, R_t, R_v [19]

この公表データをもとに, 法線方向速度比, 接線方向速度比, 速度比を読みとり, 図 4.4.6.4 に示した。その結果からは, R_n, R_t, R_v とともに, 斜面で衝突する都度大きく変動していることがわかる。斜面 A での R_v は, 0.34~0.91 まで, 斜面 B では 0.7~0.9 と小さいが, いずれも一定の値ではない。このような変動が, 入射角度と速度に大きく依存して生じている可能性があることは既に述べたとおりである。

これを確認するために, 本結果を速度比と法線方向入射速度の関係で整理したのが 図 4.4.6.5 である。図中には, 斜面 A, B それぞれについて 2 種類の SF 曲線を示した。

<斜面 A>

斜面 A のケースでは, $R_v(\text{scales})$ を 1.0 として, $K=10\text{m/s}$ と $K=17\text{m/s}$ の 2 つのケースを比較した。2 つの SF 曲線のうち, $K=10\text{m/s}$ については, あらかじめ図 4.4.6.5 (b) に示すように反射速度の予測値と実測値の比較結果から, その相関がもっとも高くなるように求めた。一方, $K=17\text{m/s}$ の SF 曲線は, 図 4.4.6.5 (a) で室内実験と同様に分布の最も外側を通るように決定した曲線である。図 4.4.6.5 (b) をみると, $K=17\text{m/s}$ の曲線を用いた予測値は, すべて実測値をオーバーしていることがわかる。この点は, 実験結果で分布の外

側を通る曲線によりほぼ上手く予測できたのとは大きく異なる。単純に考えると、予測を設計安全側、つまりより危険な方向で解析を行うのであれば、分布外側を通る SF 曲線を用いればよいが、これでは明らかに速度はもちろん軌跡についても過大評価である。

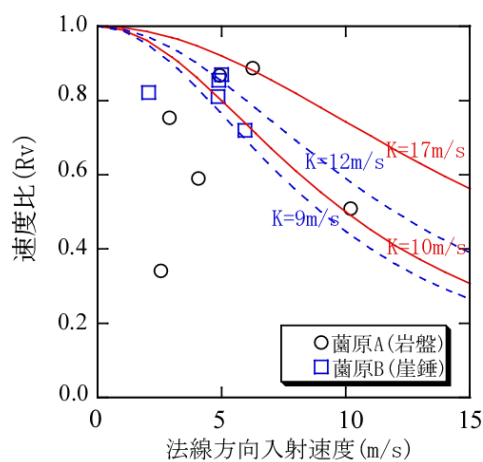
実現場では、岩塊形状の影響、衝突時の運動や姿勢変化、それに衝突地点地盤の塑性変形などにより生じるばらつきが大きいため、室内実験時のような入射速度と入射角度によるきれいな分布を期待すること自体に無理があるのかもしれない。この原因として、1)衝突地点での地盤の塑性変形、2) R_v を利用した SF 曲線の欠点の 2 点が考えられる。ここで、もっとも予測>実測となった、斜面 A の b,d,f 地点についてみると、以下のようなものである。

b 地点・・・入射角度が 80° 前後で、入射速度 13.7m/s に対し反射速度は 4.7m/s 。

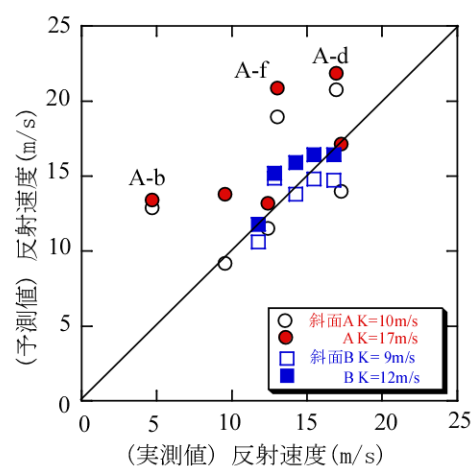
d 地点・・・入射角度が $82^\circ \sim 85^\circ$ で、入射速度 22.5m/s に対し反射速度は 16.9m/s 。

f 地点・・・入射角度が $76^\circ \sim 79^\circ$ で、入射速度 22.1m/s に対して 13.0m/s である。

つまり、斜面 A における b,d,f 地点は、いずれも入射角度が大きい場所で、減衰が大きかった場所であることがわかる。このことから、原因はいずれも前述の 1)、すなわち、衝突地点での地盤の塑性変形が主な原因と考えられる。ただし、b 地点だけは、完全な衝突といえず、一部に斜面に沿った動きを示したことが原因である可能性もある。本来は削除すべきデータかも知れない。



(a) R_v - V_{nin} 関係図と SF 曲線



(b) 反射速度の予測実測対比結果

図 4.4.6.5 菌原事例における SF 曲線による反射速度の解析結果。

<斜面 B>

斜面 B のケースでは、 $R_v(\text{scales})$ を 1.0 として、 $K=9\text{m/s}$ と $K=12\text{m/s}$ の 2 つのケースを比較した。2 つの SF 曲線のうち、 $K=9\text{m/s}$ については、あらかじめ図 4.4.6.5(b) に示すように反射速度の予測値と実測値の比較結果から、その相関がもっとも高くなるように求

めた。一方、 $K=12\text{m/s}$ の SF 曲線は、図 4.4.6.5(a) で室内実験と同様に分布の最も外側を通るように決定した曲線である。図 4.4.6.5(b) をみると、 $K=12\text{m/s}$ の曲線を用いた予測値は、すべて実測値をオーバーしているが、それでも反射速度の予測と実測の関係は斜面 A に比べとはるかに良好といえる。これに対し、ほぼ平均をとる $K=9\text{m/s}$ の曲線を用いた場合でも大きな変化はなく、良好な再現結果が得られている。このように良好な結果が得られた理由は、斜面 A とは異なり、入射角は $79^\circ \sim 82^\circ$ と狭く、速度比もほぼ $0.72 \sim 0.86$ と一定の範囲にあり大きな減衰がなかったことがあげられる。

以上の SF 曲線の適用結果から、斜面全体にわたる速度比の変動は、法線方向入射速度による依存性を考慮することで説明可能なこと、斜面における反発データがあれば、適切な SF 曲線の設定が可能となり、予測に適用できる可能性を明らかにした。

4.5 4章のまとめ

本章では、不連続変形法(DDA)による落石解析の際に用いられる入力値では速度エネルギー比(E_v)の性質についてまとめた。なお、DDA 内部では、速度エネルギー比は速度の自乗比(R_v^2)として処理されているため、本章後半の室内実験では速度比(R_v)として扱った。

4.1 では、我が国で行われた過去の実験結果をもとに、反発係数や速度エネルギー比についてのこれまでの知見と問題点をまとめた。しかし、過去の実験の多くは経験法(等価摩擦係数法)の信頼性の向上を目的としており、反発係数そのものの詳細な性質を扱った報告は少ない。近年になって、反発係数に法線方向入射速度に依存する性質があることが指摘されているが、これも現段階では正確に確認されたものではない。

4.2 では、3カ所の実際の現場における反発係数の測定結果をまとめた。計測にあたって、落下する岩塊の速度と軌跡を三次元で計測する手法を提案し、計測を行った。その結果、速度エネルギー比(E_v)にも法線方向速度比(R_n)と同様、以下の性質があることが明らかとなった。

- ①入射角度の減少とともに値が大きく減少する、
- ②法線方向入射速度が速くなるほど値が減少する、

この性質は、法線方向入射速度依存性と呼ばれ、近年ではその考慮がシミュレーションに必要と指摘されている。しかし、実現場での計測には、岩塊の形状や衝突地点での凹み(地盤の圧縮塑性変形)などの影響が大きいため、詳細な軌跡や角度の条件が不明である。

4.3 では、この結果をもとに、速度エネルギー比(E_v)の詳細な性質を調べるため、室内での追試実験を行った。実験では、入射速度を 4.2~10.m/s、入射角度を 15~75 と変えた条件で行った。この実験により以下の性質が明らかとなった。

- ①法線方向速度比(R_n)は、材質により異なる値の範囲をとる。
- ②法線方向速度比(R_n)は、法線方向入射速度の増加とともに減少する。
- ③速度比(R_v)も、法線方向入射速度の変化を受けるが、入射速度よりも入射角度の影響を大きく受ける。

以上の結果より、 R_n と R_v (すなわち $\sqrt{E_v}$)の異なるそれぞれの性質が明らかとなった。

一方、実験結果からみて、DDA において法線方向速度比(R_n)と速度比(R_v)のいずれを採用すべきかという問題もある。蓄積されたデータの豊富さからは、法線方向速度比(R_n)の方が有利と見られるが、実験結果からみると必ずしもそうとは言えない。例えば、法線方向速度比(R_n)は接線方向速度比(R_t)と同時に変化するため、現場(c)での結果のように、速度比(R_v)の漸減の結果と異なる異常なデータが突然現れることもある。入射角度の小さい

領域でも、地盤の塑性変形によるとみられる異常現象はしばしばみられ、その原因を探るためには接線方向速度比と合わせた検討が必要になる。また、計測では速度比の計測に比べると入反射角の計測は難しく、起伏の大きい場合はなおさらで、これが計測された R_n がしばしば 1.0 を越える原因とする報告もある。しかし、速度比(R_v)には、このような異常がない。また、法線方向速度比(R_n)には、これまで多くのデータが公表されているが、これには速度依存を評価する際に必要となる、速度や入反射角の範囲がほとんど記載されていない。

以上のようにみると、シミュレーションに用いる係数としては、現段階ではいずれを用いても同じといえる。これらの点を考慮のうえ、DDA のエネルギー損失評価に用いる係数には、速度比(R_v)を用いることとした。図 4.5.1 は、その流れをまとめた図である。最終的には、速度比の入射角度および法線方向入射速度に対する分布の特徴を考慮のうえ、速度比(R_v)を法線方向入射角度の関数とする、スケールファクター曲線(SF 曲線)による評価法を提案した。そして、現場実験結果および既往実験結果に適用し、速度比および反射速度を予測可能であること、また、斜面を落下する際の速度比の変動も説明可能であることを示した。

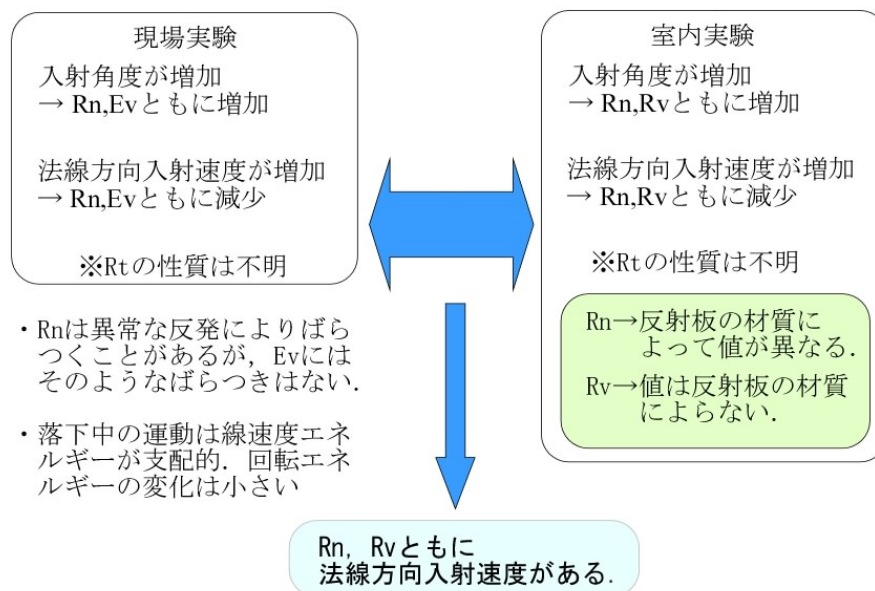


図 4.5.1 本実験結果のまとめと速度比(R_v)評価のためのフロー

本研究により、これまで指摘されることの多かった、①急斜面での衝突時に、速度エネルギー比を適用すると、速度の低減が実際より大きい、②落石対策便覧で指摘された、不

連続対解析法では速度依存性が考慮されていない，といった問題の原因と対処の方法が明らかとなった．

なお，後述するように，不連続変形法(DDA)は弾性解析法であり，反発現象も完全弾性反発である．速度比(R_v)は，運動方程式の外で乗ぜられる係数として扱われる．このため，室内実験(石英球-木製反射板)のように，入射角度の小さい領域で入射角度<反射角度となる場合には，SF 曲線による予測精度は低下する．この点は，今後，改善する必要がある．

次章では，DDA を衝突問題に適用する際に問題となる数値解析上のパラメータの決定法に触れ，これを解決した後，本特性を DDA に導入し，効果の確認へと進める．

<空白>

第4章 参考文献

- [1]日本道路協会:落石対策便覧に関する参考資料 - 落石シミュレーション手法の調査研究資料-,2002
- [2]Ritchi,A.M.:Evaluation of rockfall and its control, Highway Reserch Record, No.17, pp.13-28, 1963.
- [3]Bozzolo D,Pamini R,: Simulation of rock falls down a valley side. Acta Mech 63,pp.113-130, 1986.
- [4]Fornaro M, Pella D, Nebbia M.: Block falls on rock slopes - application of a numerical simulation program to some real cases.Proceedings of the 6th International Congress IAEG, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, pp,2173-2180,1990.
- [5]Spang R M, Sonser H. : Optimized rockfall protectection by “ROCK FALL”,Proceedings of the International Congress Rock Mechanics, Vol.3, Tokyo,pp.1233-1242,1995.
- [6]土木研究所資料：落石防災対策に関する調査報告書(その 1)，建設省と僕研究所，機械施工部動土質研究室，資料 No.2770，1989.
- [7] 古賀泰之，伊藤良弘，鷺田修三，森下義:落石の運動軌跡の予測法に関する検討，土木技術資料,Vol31-8,pp.42-47,1989
- [8]河原壮一郎，室達郎：土砂斜面の落石転動に及ぼす斜面勾配の影響，土木学会第 53 回年次学術講演会， pp.458-459,1998.
- [9]右城猛，篠原昌二，谷田幸治，八木則男：落石の斜面衝突運動に関する研究，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集， pp.91-96,2000.
- [10] S.S Wu: Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Reserch Record 1031,1984.
- [11] K.T.Chau, R.H.C.Wong, L.L.Wu:Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts, Rock Mechanics and Mining Sciences,39(2002) 69-77.
- [12]藤村尚，木山英郎，西村強，池添保雄：岩石の DEM 定数決定のための落下反発実験，土木学会第 41 回年次学術講演会， pp.237-238,1987.
- [13]熊野一美，山上拓男：落石シミュレーションに要する DEM パラメータの同定法に関する研究，第 37 回地盤工学研究発表会， pp.2263-2264, 2002.
- [14]三上善蔵：落石防止工法，理工図書，1985.
- [15]右城猛，吉田博，矢野光明，高石協，八木則男: 斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する 考察,土木学会論文集,No.581/□-37,pp49-58,1997,12
- [16]関 博，笹原克夫，伊藤興一，吉中龍之進，進士正人:落石防護工設計への不連続変形法の適用，第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集， Vol.26,p391-395,1995

- [17]T. Shimauchi, N.Sakai, Y. Ohnishi : Fundamental study of mechanical behaviors for rockfalls based on imaging analysys, Int.Proc.of the 4th Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-4), pp.473-481, 2000.
- [18]島内哲哉, 酒井直樹, 有賀誠, 大西有三, 西山哲:写真測量と CG を用いた落石挙動追跡手法に関する研究, 第 59 会土木学会講演論文集, 2004
- [19]島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹 : 衝突時の特性を考慮した不連続変形法の落石シミュレーションへの適用性の研究, 土木学会論文集 C,Vol.62,No.3,pp707-721, 2006.
- [20]島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三, 西山哲 : 衝突角度を考慮した不連続体解析法による岩盤切土時の安全性評価, 計算工学講演論文集, Vol.9, pp.205-208, 2004.
- [21]T.Shimauchi,N.Sakai,Y.Ohnishi,S.Nishiyama:Safty assessment of rock slope by discontinuous analyses considering impact angle.,Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS,pp.1239-1242 ,2004.
- [22]島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三 : ビデオ解析に基づく落石挙動の基礎的研究, 第 35 回地盤工学会研究発表会, 2001.
- [23]島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 中村公一 : 落石シミュレーションに用いる速度エネルギー比の速度依存性に関する検討, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp2241-2242,2006.
- [24]島内哲哉, 大西有三, 西山哲 : DDA による落石シミュレーションにおける衝突時係数の設定法に関する検討. 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.393-394, 2006.
- [25]島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 中村公一, 酒井直樹 : 速度比の基礎的特性に着目した不連続変形法による三次元落石シミュレーション, 土木学会論文集 C, (投稿中)
- [26]島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹 : 岩盤崩落, 落石シミュレーションに用いる入力パラメータの特性に関する研究, 平成 16 年度応用地質学会研究発表会講演論文集, pp.255-258, 2004.
- [27] Pfeiffer,T.J.,Bowen,T.D: Computer Simulation of Rockfalls;Bulletin of the Association of Engineering Geologists Vol.XXVI,No.1,1989,pp135-146
- [28] Steevens,Warren D., RocFall: A Tool for Probabilistic Analysis,Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls,University of Toront,
- [29]島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三:衝突角度の違いが落石解析結果に与える影響, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p337-342,2004
- [30]島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三, 西山哲:落石シミュレーションに用いるパラメータの速度依存効果に関する検討, 第40回地盤工学研究発表会講演論文集, pp2465-2466,2005
- [32]島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹 : 衝突時係数の入射速度, 角度による依存

性を考慮した不連続変形法(DDA)による落石シミュレーション，土木学会第60回年次学術講演会，pp349-350, 2005.

[33]名和辰雄：落石実験，ニュース，土と基礎，Vol.22,No.4,pp.84-85,1974.

<空白>

第5章 衝突問題における DDA の内部パラメータの設定法

落下，衝突，回転，滑動を中心に，複雑な挙動を示す岩塊崩落現象において，最も大きな影響を与えるのが衝突である．不連続変形法(DDA)は，開発当初，不連続面を挟んだブロック同士の大変形挙動の解析に適用されたが，Chen[1], Shinji[2]らによる落石問題への適用以来，多くの研究がある．

ところで，DDA によるシミュレーションでは，これまで述べてきたように粘性係数や速度エネルギー比の他にも，ペナルティバネや時間刻みなど，数値解析上のパラメータの設定が必要である．前者は外部パラメータと呼ばれ，後者は内部パラメータと呼ばれる．近年，この内部パラメータの設定によっては解析時に予想外の減衰を生じることが指摘されている．しかし，これらの内部パラメータの性質やその設定方法に関してはほとんど明らかになってはいなかった．本研究では，この点について布川が提案した方法の実証検討を行い，その効果を確認した．本章では，この結果をもとに，落石解析に DDA を適用する際の内部パラメータの設定法について提案する．

5.1 DDA の内部パラメータに潜む問題

DDA による落石解析を成功させるためには，4 章で述べた物理定数の設定の他にも，解析手法内部に存在するいくつかの解析パラメータ適切に設定する必要がある．しかしながら，近年，これらのパラメータが不適切である場合，解析の進行に伴って異常な減衰を生じることが指摘されている．Ohnishi(2005)らは，DDA このようなパラメータを，図 5.1.1 のように整理している[3]．

(1) 物理的ダンピング	外部パラメータ ・粘性係数(η) ・速度エネルギー比(E_v)
(2) 解の安定性を左右する要素	内部パラメータ ・時間増分(Δt) ・ペナルティバネ(kn)
(3) 数値解析ダンピング	アルゴリズムックダンピング(Newmark) ・静的，動的解析スイッチ)

図 5.1.1 DDA 解析における外部および内部入力値[3]

(1)の物理的ダンピング(粘性係数や速度エネルギー比)は，解析する対象や現象を説明するための入力値であり，4 章で述べたようにこれにも減衰に関する特性がある．(2)の解の安定性を左右する要素とは，時間増分(Δt)やペナルティバネ(Kn)，変位比(DAR)など，DDA

特有のパラメータであり、解析の安定性や精度を左右する入力値としてしばしば問題となる。一方、(3)の数値解析ダンピングは、DDA の時間刻みを追った解析法自体に潜む問題であり、これが(2)の問題と複雑に絡んでいることが明らかとなっている。本節では、まず(3)数値解析ダンピングについて述べ、ついで(2)解の安定性を左右する要素について述べる。

5.1.1 DDA の基礎理論に潜む数値解析ダンピング

DDA は、時間ステップ毎に釣り合いを計算するが、その際、前ステップの運動を引き継ぐか引き継がないかで静的、動的解析が区分される。落石解析や地震応答解析などでは動的解析が用いられる。入力には、静的解析=0、動的解析=1 の値を設定するが、これは静的・動的スイッチ(k_{01})と呼ばれる。

ところで、3 章で述べたように、DDA(shi,1984)は式(5.1)に示す Hamilton の原理による接触を含む運動方程式をひずみエネルギー最小化原理により釣り合い方程式を求めて定式化している。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad 5.1.1$$

式(5.1.1)の減衰マトリックス C は、粘性係数 η と質量マトリックス M を用いて、式(5.1.2)で表されることも、既に述べたとおりである。

$$C = \eta_e M \quad 5.1.2$$

一方、式(1)の運動方程式の解は、Newmark の β 、 γ 法を用い、 $\beta=0.5$ 、 $\gamma=1.0$ として、増分変位に対する式(3)を時間刻みで解くことにより得られる[1]

$$\tilde{K} \cdot \Delta u = \tilde{F} \quad 5.1.3$$

ここに

$$\tilde{K} = \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{2\eta}{\Delta t} M + \frac{\rho^c}{\rho^0} [K_e + K_s] \quad 5.1.4$$

$$\tilde{F} = a\left(\frac{2}{\Delta t} M \cdot \dot{u}\right) + (\Delta F - \sum \int \sigma dv) - M\alpha(t) \quad 5.1.5$$

また、 Δu :増分変位、 K_e :線形項の剛性マトリックス、 K_s :剛体回転に伴う初期応力マトリックス、 $\alpha(t)$:地震角度の時刻歴、 ρ^0 :変形前の体積密度、 ρ^c :変形後の体積密度である。また、通常 $\rho^c/\rho^0 \doteq 1.0$ である。

ところで、DDA における静的解析では $k_{01}=0$ が、動的解析では $k_{01}=1.0$ が採用される。 $k_{01}=0$ では、前ステップから引き継ぐ加速度項はゼロであり、 $k_{01}=1.0$ だと前ステップの加速度項が引き継がれる。地震解析や落石解析は動的解析であるため、 $k_{01}=1.0$ が用いられる。しかしながら、このスイッチに、経験的に、 $k_{01}=0.90 \sim 0.99$ の値が用いられることがある。

今、仮に $k_{01}=0.95$ とすると、式(5.1.3)は、式(5.1.4)、式(5.1.5)を用いて以下のように書き表されたことになる。

$$\left\{ \frac{2}{\Delta t^2} M + \frac{0.05 \times 2}{\Delta t} M + [K_e + K_s] \right\} \cdot \Delta u = 0.95 \left(\frac{2}{\Delta t} M \cdot \dot{u} \right) + (\Delta F - \sum \int \sigma dv) - M \alpha(t) \quad 5.1.6$$

Hatzor は、この式は、式 5.1.2 中に 5%の粘性減衰 ηe を導入したのと同じであると述べている[6].

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{0.05 \times 2}{\Delta t} M \right\} \cdot \Delta u &= 0.05 \left\{ \frac{2}{\Delta t} M \right\} \cdot \Delta u \\ &= 0.05 \left(\frac{2}{\Delta t} M \cdot \frac{\Delta t}{2} \dot{u} \right) \\ &= 0.05(M) \cdot \dot{u} \end{aligned} \quad 5.1.7$$

ただし、式 5.1.2 に導入する方法は、全体が均質な場合には良いが、不均質な場合や複合材料からなる場合には式 5.1.4 に導入されると考えられる[4][5].

この方法は、多くのブロック同士が摩擦運動を介して相互に影響を及ぼすような解析の場合に過大な接触を弱める目的で用いられるようであるが、衝突運動で用いられることは無い。

5.1.2 解の安定性を左右する内部パラメータ

DDA における時間積分には、Newmark(ニューマーク)の β 、 γ 法が用いられている。ニューマーク β 法では、変位と速度を次のように時間に関して離散化する。

ここで、 $A(n)$:ブロック重心の加速度ベクトルとすると、ブロック重心の変位ベクトルとブロック重心の速度ベクトルは、それぞれ式(5.1.8)、式(5.1.9)で表される。

$$\Delta u^{(n)} = V^{(n)} \Delta t^{(n)} + \frac{(\Delta t^{(n)})^2}{2} (1 - 2\beta) A^{(n)} + (\Delta t^{(n)})^2 \beta A^{(n+1)} \quad 5.1.8$$

$$V^{(n+1)} = V^{(n)} + (1 - \gamma) A^{(n)} \Delta t^{(n)} + \Delta t^{(n)} \gamma A^{(n+1)} \quad 5.1.9$$

ここに、 $A(n+1)$ は、ステップ $n+1$ における加速度ベクトルを表す。 β と γ は、Newmark 法の特性値と呼ばれ、一般には、安定のために $2\beta > \gamma > 0.5$ が必要とされる。

DDA では、 $\beta=0.5$ 、 $\gamma=1.0$ が用いられていることは、前述のとおりである。
ここで、以下のような単純なモデルを考える。

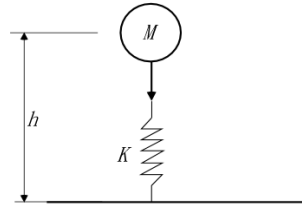


図 5.1.2 一次元接触モデル

$$w = -Mg = kx_0 \quad 5.1.10$$

$$F = -Mg - kx = -(k(x - x_0) = -kx' \quad 5.1.11$$

ここに、 $x' = x - x_0$ は、落下高さ(h)と等価な距離である。
Newton の法則に従えば、加速度 A は、以下のように表される。

$$A = -\frac{k}{M} x' \quad 5.1.12$$

ここに、 $A = d^2 x' / dt^2$ とすると、式(5.1.12)は以下の振動方程式の形で表される。

$$\frac{d^2 x'}{dt^2} + \frac{k}{M} x' = 0 \quad 5.1.13$$

この式は、以下の角周期の固有振動の関係と同じである。

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad 5.1.14$$

ここに、変位 $x(t)$ の一般解は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} x(t) &= (Amp) \sin(\omega t + \phi) \\ &= (h + x_0) \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad 5.1.15$$

ここに、Amp は振動の振幅、 ω は等速円運動の角速度、 ϕ (rad) は時間 $t=0$ (sec) の回転角である。

図 5.1.3 は、図 5.1.2 のモデルにおいて、球体の位置エネルギー(位置、動、バネを含む)と全エネルギーが時間を追ってどのように変化するかを実験した結果である。図中の太点線が DDA による解析結果、細点線が理論解である。DDA の入力値は、 $w=26\text{kN}$ 、 $h=4\text{m}$ 、

$k=3000\text{MN/m}$, $\Delta t=0.0001\text{sec}$ である.

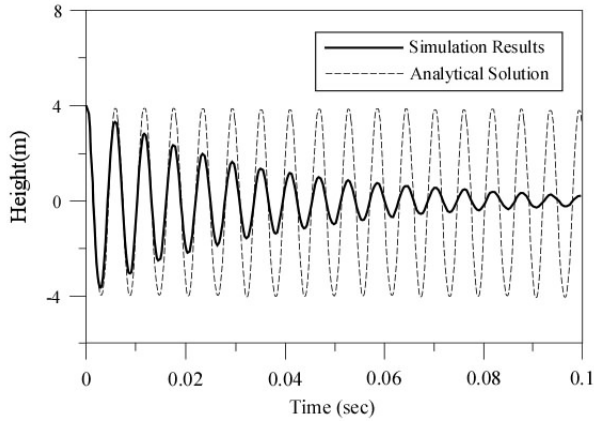


図 5.1.3 図 5.1.2 実験の $\Delta t=0.0001\text{sec}$ のときの結果[3]

本図は, DDA 解析結果による全エネルギーが, 時間とともに指数関数的に減少していく様子を示している. このとき, 全エネルギーと時間との間には, 以下のような対数減衰的な関係が存在する.

$$TotalEnergy = E_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad 5.1.16$$

ここに, E_0 は全エネルギー, t は時間, λ はダンピング係数である.

このような, 時間ステップとダンピング係数との関係は, 図 5.1.4 に示すように, 時間刻み(Δt)だけでなく, ペナルティバネにも生じている. このような結果は, 一次元バネモデルにおける数値解析中に数値減衰が存在することを示しており, 既に Wu や Wang(1996), O'sullivan(2001)らによって指摘されている. やっかいなことに, DDA では, このペナルティバネとタイムステップの両方が数値減衰を増加させる.

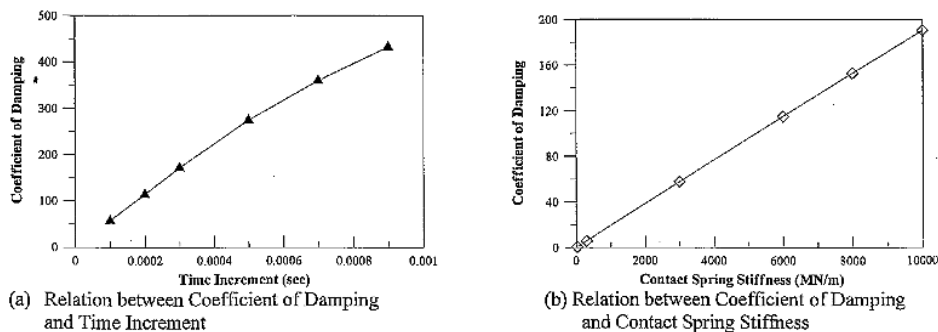


図 5.1.4 時間刻みとバネの数値減衰[3]

5.2 三次元剛体球要素不連続変形法 (DDAball) について

不連続変形法(DDA)は、3章で用いた三次元 DDA の他にも、二次元楕円 DDA、球状剛体要素 DDA など、さまざまなタイプの DDA が開発されている。そのいずれもが岩盤崩壊から落石まで解析可能であるが、本研究では、衝突時の速度比の特性を調べるのが目的であり、多角形の形状による影響を極力避けること、また本来落石は三次元解析が望ましいなどの理由により、三次元剛体球要素 DDA を用いた[4][7][8][9][10]。

5.2.1 三次元 DDAball の未知数と剛体球要素の変位

剛体球要素における定式化は、多面体要素の定式化と同じ手順で行われる。ただし、要素を剛体としているため、未知数は要素の剛体並進変位と剛体回転のみとなる点が、二次元 DDA とは異なる。

半径 r 、重心が (x_0, y_0, z_0) の剛体球内部の任意の点の並進運動の変位は、重心の並進変位を (x_c, y_c, z_c) とすると、式 5.2.1 で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{pmatrix} \quad 5.2.1$$

また、剛体回転変位は、重心における X,Y,Z 軸に関する回転を (r_x, r_y, r_z) とすると、式 5.2.2 で表される。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & z - z_c & -(y - y_c) \\ -(z - z_c) & 0 & x - x_c \\ y - y_c & -(x - x_c) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} \quad 5.2.2$$

剛体球要素内の任意点における変位は、式 5.2.1 および式 5.2.2 から、次のように表される。

$$(uvw)^T = [T(x, y, z)] [D_i] \quad 5.2.3$$

ただし $[T(x,y,z)]$ は、変位関数で以下のとおりである.

$$[T(x,y,z)] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z - z_c & -(y - y_c) \\ 0 & 1 & 0 & -(z - z_c) & 0 & (x - x_c) \\ 0 & 0 & 1 & y - y_c & -(x - x_c) & 0 \end{pmatrix} \quad 5.2.4$$

また $[Di]$ は未知数であり、以下のとおりとなる.

$$[Di] = (u_0 \ v_0 \ w_0 \ r_x \ r_y \ r_z)^T \quad 5.2.5$$

DDA では、 $[Di]$ を用いてステップ毎の要素の変位が計算され、重心位置が更新される.

以後は 3 章で説明した二次元 DDA 同様、慣性力、粘性項、物体力、荷重項などを外力項、剛性項に組み込み、剛性方程式を組み立てる. その後、接触マトリックスの作成と接触判定へと移る.

5.2.2 平面要素と剛体球要素の接触判定

図 5.2.1 の各ブロックのサブマトリックスの作成では、式を基本として作成される. そして、以下の全体剛性マトリックスが求められ、ついで、前ステップ位置と今回ステップとの相対位入は、置から接触状態、変位が求められる.

DDAball では、”壁要素”と呼ばれる厚みのない平面要素が導入され、主に地形を表すために用いられるが、この要素と球の接触、貫入は次のように定式化される.

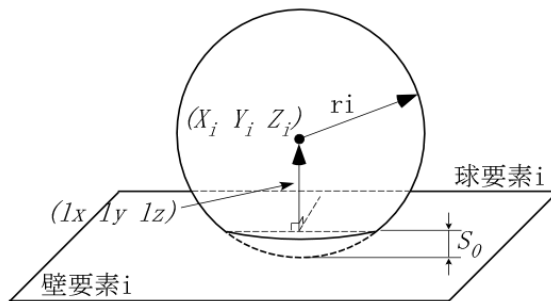


図 5.2.1 DDAball 接触時の状態[7]

図 5.2.1 に示すように、中心を (x_i, y_i, z_i) とする半径 r_i の球体と、壁要素の法線方向の接触

を考えたとき，平面の方程式を

$$ax + by + cz + d = 0 \quad 5.2.6$$

として，変位前の壁要素と球面の距離を S_0 とすると， S_0 は以下で表される．

$$S_0 = \frac{ax_i + by_i + cz_i + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} - r_i \quad 5.2.7$$

また，球要素 i が (u_0, v_0, w_0) だけ移動した後の球の中心と平面との距離および球の半径から，貫入量 sn は，次のように表される．

$$\begin{aligned} S_n &= S_0 + \frac{au_0 + bv_0 + cw_0}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ &= S_0 + [D_i]^T [T_i]^T (l_x l_y l_z)^T \end{aligned} \quad 5.2.8$$

ここに， $(l_x l_y l_z)$ は壁要素の単位法線ベクトルであり，次のように表される．

$$l_x = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad l_y = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad l_z = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad 5.2.9$$

ブロックが，接触していると判定されるとペナルティバネが導入される．ここで，ペナルティバネを kn とすると，壁要素との接触による鉛直方向ペナルティバネによるポテンシャルエネルギー Π_n は，以下のように表される．

$$\Pi_n = \frac{1}{2} k_n S_n^2 \quad 5.2.10$$

ポテンシャルエネルギーを最小化することにより，以下の剛性マトリックスと外力マトリックスが得られる．

$$k_n [T_i(x_0, y_0, z_0)]^T (l_x l_y l_z)^T (l_x l_y l_z) \rightarrow [K_i] \quad 5.2.11$$

$$-k_n S_0 [T_i(x_0, y_0, z_0)]^T (l_x l_y l_z)^T \rightarrow [F_i] \quad 5.2.12$$

この後、接触している球要素 i, j のせん断方向の接触マトリックス、さらに摩擦力が導入される。このような接触後のバネの導入は、DDA プログラム中では後述する open-close と呼ばれる判定の後行われる。

5.3 DDAball で用いられるニューマーク法の特徴

Newmark β 法に起因する数値減衰について、布川(2006)は DDA におけるこのような特性は、時間増分だけではなく、 Δt と固有値 λ の積である $\lambda \Delta t$ で決まり、減衰が小さい系では固有振動数(ω)と時間増分(Δt)の積である $\omega \Delta t$ に比例すると述べている[13].

ここに、 $\omega \Delta t = 2\pi \Delta t/T$ であるので、 $\Delta t/T$ が解の安定性や精度を評価するうえで重要となる。また、 $\Delta t/T$ は、

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad 5.3.1$$

と表される。ここに、 Δt :時間増分、 K :バネ剛性、 M :質量、 T :周期である。したがって、 $\Delta t/T$ は一周期に対する時間刻み数を表す。つまり、DDA による衝突解析では、衝突後のブロックがペナルティバネにより押し戻されて再び跳躍するまでに、ペナルティバネに 1 周期分の振動が生じる。このとき、時間増分だけでなく、ペナルティバネや物体の大きさ(質量)も解の安定性や精度に影響を与えるパラメータとなることを表している。

図 5.3.1 は、図 5.1.2 の一次元接触モデルにおいて、球の半径を 0.1m, 0.25m, 0.5m, 1.0m と変えたときの $\Delta t/T$ と衝突前後の速度エネルギー比 ($E2/E1$) との関係である。ペナルティバネは、一定値 (1×10^6) としている。また、 $E2/E1$ は、1.0 のとき弾性反発を表し、これ以下では減衰があることを示す。曲線は、 $\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$ の K , M を一定として Δt を変化

させたときの計算結果を速度エネルギー比としてプロットしたものである。

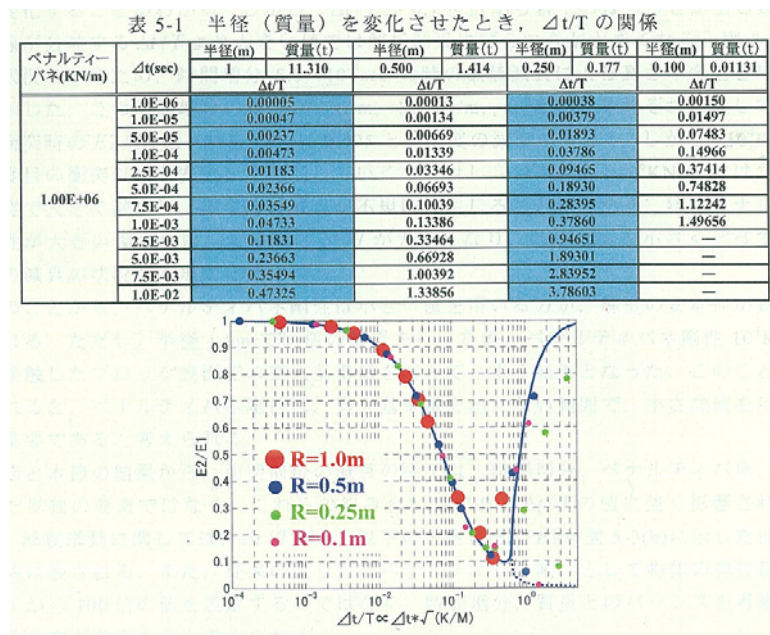


図 5.3.1 異なる質量, 異なる時間増分における減衰の変化[13]

図中の曲線は、 $\beta=0.5$, $\gamma=1.0$ とした時のものであり、このとき $E2/E1$ の最小値は $\Delta t/T=0.6$ 付近にあり $E2/E1=0.1$ である。 $\Delta t/T$ がこれより小さくなるほど $E2/E1$ は 1.0(すなわち正解値)に近づき、逆に大きいとばらつき、解が不安定になることがわかる。この例では、 $E2/E1$ が 0.95 以上の正解値(精度)を持つためには、 $\Delta t/T < 0.02$ でなければならないことになる。

一方、図 5.3.2 は、ペナルティバネを $1 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 、時間刻みを 0.0005 に固定したとき、球体の大きさの違いが減衰に与える影響を、2 回目以後の反発高さの変化で見たものである。

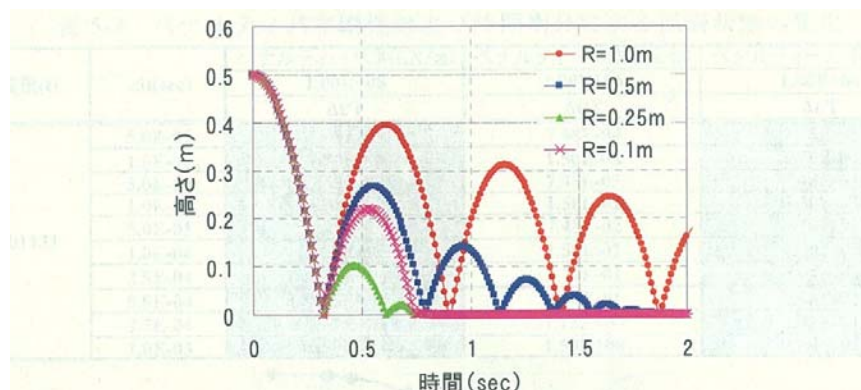


図 5.3.2 質量の違いが数値減衰に与える影響 $\Delta t=5.0 \times 10^{-4} \text{ sec}$ [13]

本結果から、上記の kn と Δt の条件下では球体が大きいくほど、すなわち $\Delta t/T$ が小さいほど減衰挙動が安定していることがわかる。

一方、球体の半径を 0.1、時間刻みを 0.00005 に固定して、ペナルティバネを $10^4, 10^6, 10^8 \text{ kN/m}$ の 3 段階に変化させて同様の実験を行った結果が図 5.3.3 である。シミュレーション結果からは、2 度目の衝突による減衰はほぼ同じであるが、3 番目の衝突以降はバネによる影響が表れている。

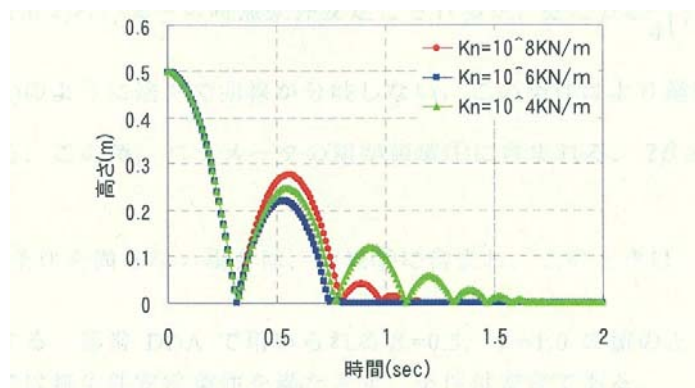


図 5.3.3 バネを変えた場合の落下高さの変化 $\Delta t=5 \times 10^{-4} \text{ sec}$ [13]

以上の結果から、ペナルティバネバネは、貫入量基準を超えない範囲で小さい値を用いる方が良いことがわかる。布川は、 $\Delta t/T < 0.1$ で $E2/E1$ の定量的な評価は可能となるが、 $E2/E1$ を 95%以上とするための目安として、 $\Delta t/T < 0.05$ という値をあげている[13]。これは、 $\Delta t/T$ の一周期に対して 20 点以上の刻みをとることを意味している。ただし、 $\Delta t/T < 0.05$ という値は、図 5.3.2 をみるとやや大きすぎるようであり、明確な出展も不明なところがある。これについては以下の<追記>に示す。

以上、DDA で時間空間への展開に用いられる Newmark 法には、数値減衰が発生する要素が含まれること、その影響には落下物体の質量、 Δt 、ペナルティバネが深く関わっていることを述べた。次に、これらの関係と性質を、接触判定のなかで具体的に見てみることにする。

<追記>

DDA ではニューマーク β, γ 法を適用する際、 $\beta=0.5, \gamma=1.0$ が用いられていることは 5.1.2 で述べたとおりである。一般に、ニューマーク法では、解の無条件安定と精度のために $\beta=1/4, \gamma=1/2$ が推奨されており、 $\gamma > 1/2$ の時には数値減衰が生じ、部分安定であることが知られている。

このような、ニューマーク法の安定性と精度との関係は、一般に $\Delta t/T$ とスペクトル半径との関係で論じられる。図 5.3.4 は、 β と γ の変化がスペクトル半径に与える影響を表した図である。図 5.3.4(a) は、 $\beta=0.5$ として γ を 0.99~0.5 までの間で変化させたときの、また図 5.3.4(b) は、 $\gamma=0.9$ のときに β を 0.45~0.49 の間で変化させたときのスペクトル半径の変化を示している。

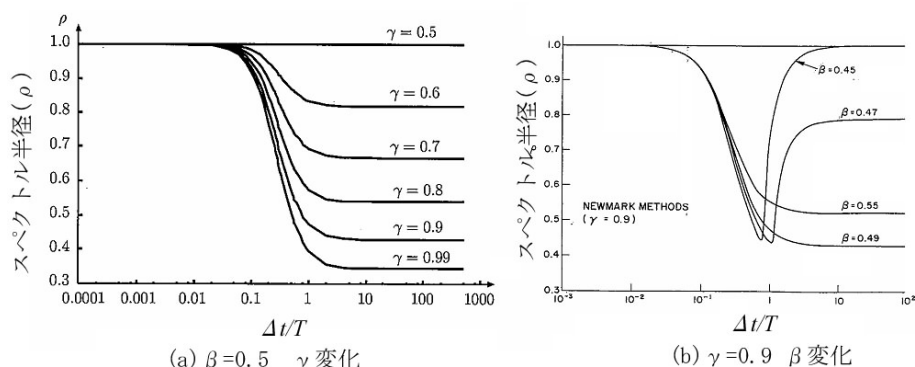


図 5.3.4 ニューマーク法のスペクトル半径- $\Delta t/T$ 変化曲線

本図から、 $\beta=0.5, \gamma=1.0$ (図中で $\gamma=0.9$ としている) のとき、 $\Delta t/T$ が 0.05 以下ならば、スペクトル半径はほぼ 1.0 となり、減衰を抑えられることがわかる。布川が提案した Δ

$t/T < 0.05$ の根拠は、このような理由によるものと推察される.

5.4 DDA の接触機構と Δt , ペナルティバネ, 変位比の性質.

前項では DDA の解析ステップに潜む数値減衰の問題に触れ, 一方, DDA では物体同士が衝突する際, 時間ステップ毎に Open-Close と呼ばれる接触判定が行われる. これは, 後述するように, 地表面ラインの表と裏にそれぞれ判定基準ラインを設け, ブロックのステップ毎の位置を監視することで, その位置によって接触の有無を判定するものである.

ここでは, DDAball を例に, 接触判定の流れを説明し, 次いで接触の機構と open-close 収束判定にかかわる質量, Δt , ペナルティバネ, 変位比の相互の関係を調べる.

5.4.1 DDAball におけるプログラムの流れ

図 5.4.1 に, DDAball の 1 ステップにおける解析の流れをフローチャートで示す.

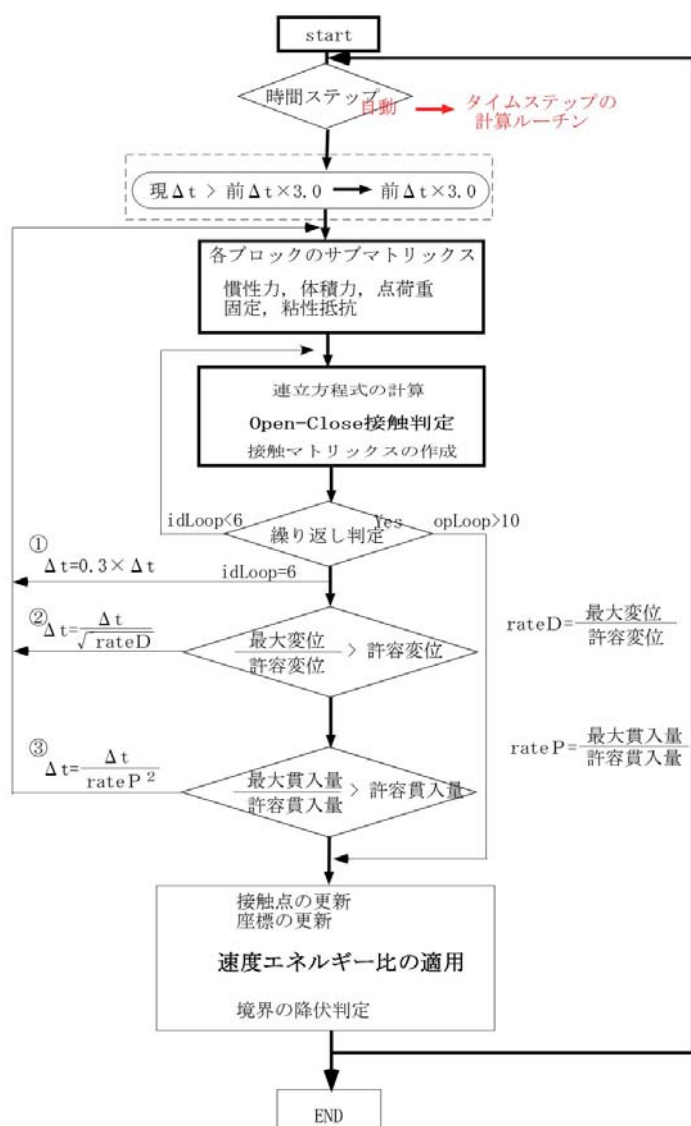


図 5.4.1 DDAball における 1 ステップの流れ

図 5.4.1 は、プログラム内に内蔵されている時間刻みとペナルティバネの自動計算に関する部分のルーチンは除いている。

接触判定は、時間刻みと変位を基準にして進められる。後述するように、open-close 法によって接触が判定されると、まず図中①に示す open-close 過程の収束判定段階で時間刻みの妥当性が判定される。その中で、収束しない場合は時間刻みを 1/3 に縮めて再度収束を検討する。次いで②に示す許容変位に関する判定が行われる。「時間刻みあたりの変位/許容変位」が許容変位以下であれば次のステップに進むが、もしここで許容変位より大きければさらに時間刻みを「時間刻みあたり/許容変位」の平方値で除して時間刻みを減じ、次のステップへと進める。さらに、③では、「最大貫入量/許容貫入量」をもとめ、許容貫入量より大きい場合には、さらに磁化刻みをこの比で除して、次のステップへと進める。このように、3 段階のステップを経て、解析の安定化を図っているが、実際の落石解析では②の段階で問題となることが多く、①と③のステップで時間刻みが修正されることはほとんどない。これは、この解析過程が落石のような衝撃を想定したものではなく、もともと大きな時間刻みを用いて効率化を目指して開発されたためと考えられる。

実際、高速で衝突する球体に対し、①では対処困難なことが多く、③まで達するようであれば既に貫入異常の状態となる。この意味でも、落石解析では、適切な時間刻みを設定することが最も重要である。

5.4.2) DDAball における接触判定

前述のように、DDA では、地表面の表と裏に接触判定するための基準ラインがあることは既に述べたとおりである。図 5.4.2 は、この基準ラインについて示した図である。DDA では、時間ステップ前後のブロックとこれらのラインとの間の位置関係によって接触状態が判定される。この過程は、open-close 判定と呼ばれる。次に、この過程を述べる。

落下中の落石が接触検索範囲にかかると接触探索の準備が始まる。

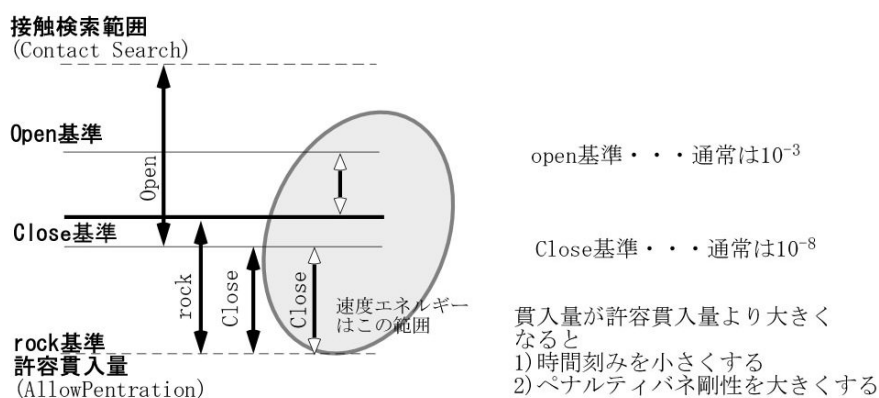


図 5.4.2 Open-Close 判定

ここで、横の黒い太線が壁要素の面であり地表面を表す。DDA では、この地表ラインの外側に Open 基準、内側に Close 基準と rock 基準(許容貫入量)のラインが設定されている。ブロックが入るときと出るときに、それぞれどのように通過したかを前ステップでの判定と比較し、ペナルティバネや摩擦を導入するタイミングを決めている。ここで、Open とは、ブロックが接触可能範囲にある状態、Close とはブロックが接触している状態を指す。また、Rock とは Close の特別な状態(ブロック間の摩擦で接触部で相対的な変位が生じない)を指し、図中の許容貫入量位置を指す。DDAball では、Lock 基準は入力値である。

通常、open 基準は 10^{-3} 、close 基準は 10^{-8} の小さな値に設定される。単位を m とするならば、open 基準は 1mm、close 基準は 10^{-5} mm という微少な距離である。したがって、もし 10m/sec で衝突する落石を解析しようとする、わずか 1mm の open 基準に引っかかるようにするためには、 Δt は単純に 1/1000sec 以下にしなければならないことになる。このことから、 Δt はかなり小さくする必要があることがわかる。

解析では、複数のブロックがある場合、接触と判定されたすべてのブロックの接触部において、接触マトリックスとして処理した内容と、変位計算後の接触状態が一致している否かについてチェックが行われる。もし、一致しない場合、6 回までは同様の作業が行われるが、通常はほとんど 1 回で収束する。落石解析の場合、6 回まで繰り返すようなら Δt をさらに小さくしなければならない。

変位計算後の接触状態で接触マトリックスを組み立てるが、このとき、例えば変位計算前に Close 状態として接触マトリックスを組み込んだ接触部が、変位計算後に Open 状態になった場合には、Open 状態として接触マトリックスが組み立てられる。判定は、この前後の状態によって行われるが、この時の組み合わせには、以下のような場合がある。

Open 状態(接触サブマトリックスが適用されない)

Open 状態からブロック貫入量が[Close 基準-許容貫入量]になった場合 → Close 状態

Close 状態のブロックが分離し、Open 基準以上となった場合 → Open 状態

Close 状態(接触サブマトリックスが適用される)

Close 状態 (ブロック表面でせん断力<摩擦力のとき) → Lock 状態

Close 状態 (ブロック間の貫入量が Open 基準以上となったとき) → Open 状態

Lock 状態(接触サブマトリックス+せん断方向マトリックス)

Lock 状態 (ブロック表面で、せん断力<摩擦力のとき) → Close 状態

以上を図示したのが、図 5.4.3 である。
白矢印が前ステップ、黒矢印が今回ステップを表している。

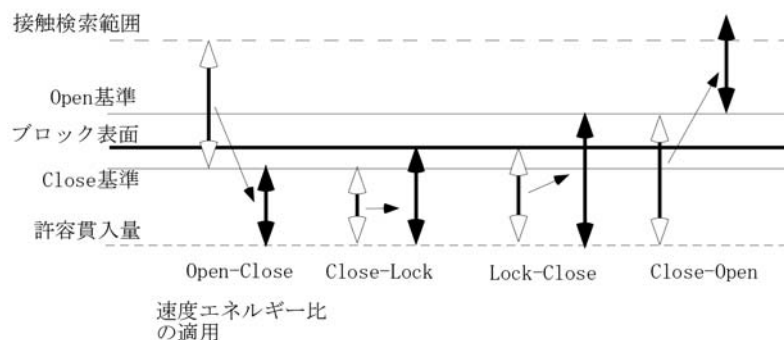


図 5. 4. 3 Open-Close 判定による運動の推移

つまり、理想的には、open-close となり、close-open ないし lock-open の順に変化するの
が良好な反射ということになる。ただし、実際の解析過程では各状態の遷移は単純ではな
く、例えば貫入後、つまり open→close から、close→close という過程をしばらく経て、ブ
ロックは再び open 状態、つまり地表面から飛び出すことになる。

落石解析で導入される速度エネルギー比は、最初に open→close となった時に作用する。
このため、バネは速度エネルギー比によって減衰した速度に対して働くことになる。

5. 4. 3) DDAball におけるペナルティバネと時間刻み

解の安定性を左右する要素として、時間ステップ、ペナルティバネがある。これらのパ
ラメータは、相互に関連するため、わずかな変化が結果に与える影響が大きく、また DDA
の内部では設定値を使う場合や自動計算させる場合など、条件もまちまちであるため詳細
は不明なままであった。このため、DDA を落石解析に用いる場合には、その都度次元モ
デルによる衝突実験を行って、適切と思われるペナルティバネやタイムステップを決定し
ていたのが実情である。

本節では、最初に DDAoriginal における従来の説明について述べ、ついで石川(2006)ら
が行った自由落下試験によるパラメトリックスタディの結果を述べる[11][12]。また、最後に
DDAball を用いて行った実験結果についてまとめた[13]。

(1) DDAoriginal における時間刻み、ペナルティバネ、変位比について。

DDA プログラムでは計算のために、時間刻み($G1=\Delta t$)と、想定最大変位比($G2$)、そして
ペナルティバネ(kn)を必要とする。ただし、現在配布されているバージョン(6.0)では、時
間刻み($G1$)は想定最大変位比($G2$)から決定される。マニュアルでは、時間刻み($G1$)は、微
小変位の仮定を満足するように小さな値が推奨されている。

一方、想定最大変位比(G2)は、経験的に、画面に分布するブロック間の縦方向距離の 1/10 ～1/100 が入力される。 W_0 を、画面領域に分布するブロック中心の縦方向距離とすると、最大想定変位量は、以下の式で表される。

$$0.5 \cdot W_0 \cdot G2$$

G2 も、 Δt 同様、微小変位の仮定を満足し、open-close 反復の収束を保証するために小さな値が推奨されている。G2 は、現在のステップでの接触の可能性を判定するのに用いられ、2 つのブロックの辺または頂点の距離が、 $2.5 \cdot 0.5 \cdot W_0 \cdot G2$ 以下になると接触の可能性をチェックする。また、各ステップでの最大変位量は、 $0.5 \cdot W_0 \cdot G2$ となるように調整される。すなわち、プログラムはステップ毎に以下の R を出力し、これをもとに時間ステップに反映させる。

$$R = \frac{\text{最大変位量}}{0.5 \cdot W_0 \cdot G2}$$

もし、R が 1 に近ければ、想定最大変位と計算後に得られた最大変位量がほぼ等しいことになり、時間刻み(G1)が適切であったことになる。逆に、R が 1 より非常に小さい場合は時間刻み(G1)を大きな値に設定すればよいことになる。また、もし $R > 3$ なら、G1 は G2 に変更される。すなわち、時間刻みが 1/3 に低減される。なお、R が 1 よりもかなり大きくなると、open-close 反復後にブロック間に食い込みを生じる可能性が増える。この場合は G2 を大きくとればよい。G2 の範囲は、通常 0.01～0.001 とし、1 ステップあたりの変位量を $0.5 \cdot W_0 \cdot G2$ よりやや小さめにするのがよいとされる。このように、G1 と G2 の設定は複雑であり、適切な解析を行うにはかなりの経験が必要となる。

ただし、本説明から推察されるように、G2 は基本的に時間刻みに対する比、あるいは時間刻みそのものである(DDAball では時間刻みそのもの)。前述のように、高速で飛び込む落石の解析に際して、このような時間刻みの 2 段階判定は、必ずしも得策とは言い難い。DDA を落石解析に適用する際には、時間刻み(Δt) = 相対変位比(G2)とするか、あるいは $\Delta t \propto G2$ とした方が良いことを付け加えておく。

一方、接触バネ剛性(ペナルティバネ)(G0)の設定もまた難しい。現実には、ペナルティバネは非線形であり、接触力が小さければ小さいバネでよく、接触力が大きい場合には大きなバネを必要とする。やっかいなのは、変位と同時に計算される変形は弾性係数によって支配されるため、弾性係数との関係も無視できないことである。この点について、佐々木らは、次のように指摘している。

静的解析において、ペナルティバネの値は一般にブロックの弾性係数より大きな値が用いられる。もし、ペナルティバネが弾性係数より小さいと収束が悪くなり、ときにはプロ

ック同士が重なって、ペナルティバネが効かなくなる場合がある．このため、一般には

$$E < p < 100E$$

程度の値が採用される．ここに、 E はブロックの弾性係数である．ただし、ペナルティバネの値が $1000E$ を超えると、コンピュータ上の問題で、剛性マトリックスを解く際に桁落ちを生ずる可能性があることも指摘されている．

これは、DDA のモデルにおいて、面積が極端に違うブロック同士の接触において上記のような問題が生じることを指している．解決策として、はなるべくブロック間の面積を近づけるために、例えば地形ブロックを薄い板状にすることを提案している(不連続性岩盤実用化研究会)．3 章で説明した落石の例題は、実際この方法で解析している．

(2) DDAoriginal による時間刻み、ペナルティバネ、変位比のパラメトリックスタディ．

石川(2006)らは、図 5.4.4 に示すような自由落下実験を行った．そして、この結果をもとに DDAoriginal による時間刻み、ペナルティバネ、変位比に関するパラメトリックスタディを行った．実験は、 $\phi 40\text{mm}, 60\text{mm}$ の石球と鉄球を用いて、落下高さを $0.2, 0.4, 0.6\text{m}$ と変え自由落下後の反発特性を再現する目的で行われた．表 5.4.1 は解析に用いたパラメータである．

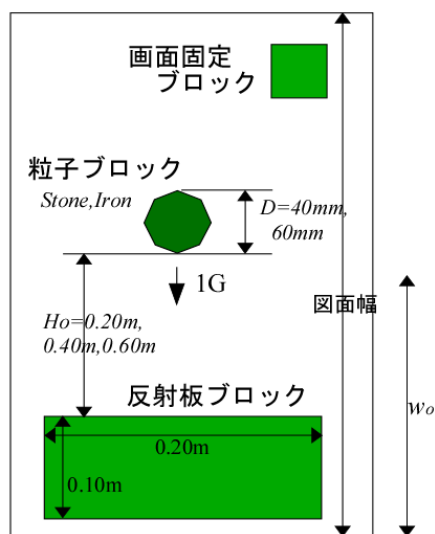


表 5.4.1 解析パラメータ

種別	石	鉄
密度 γ (t/m^3)	2.70	8.00
ヤング率 E (GPa)	20	210
ポアソン比 ν	0.1	0.3
粒子間摩擦角 ϕ (deg)	0	0
粘着力 C (μ (kPa))	0	0
反発係数 COR	1.0	1.0

図 5.4.4 石川らの解析モデル[12]

石川らは、実験結果の落下高さと跳ね返り高さの比から求められた反発係数の特性を、次のようにまとめている．

- 1) 径が大きく、落下高さが大きいほど反発係数は小さい．
- 2) 反発係数とエネルギーの関係は材質によって決まる．逆に、材質が異なれば反発係数も異なる．

3) この原因は、衝突時に生じる局所的な塑性流動にある。

この結果は、本研究の4章で述べた結果と同じであるが、密度の大きい鉄球を用いていることから、密度が反発係数に与える影響について論じている点が質量によるスケール効果を伺わせる、興味深いデータである。

この実験結果をもとに、DDAoriginalを用いて、反発係数を1.0とした弾性反発を仮定し、もとの高さまで反発するか否かをテストしている。シミュレーションでは、時間刻み、変位比、ペナルティを組み合わせで変化させたパラメトリックスタディを行い、以下の結果を得ている。

1)時間刻みが小さい($\Delta t=0.0001\text{sec}$)と良好な結果が得られる。

- ・逆に大きいと解は不安定となる。そして、これは材質には無関係である。
- ・接触時間が長くなると1.0からはずれる。接触時間が長いのは Δt が大きい場合。
- ・接触時間が長くなると誤差も大きい。

この実験に続き、やはり反発係数を1.0として、解析制御パラメータを次の3つに分け、それぞれの特性を調べるパラメトリックスタディを行っている。

①独立型入力パラメータ

画面領域($w0$)、許容変位比($G2$)、ペナルティバネ(kn)、open 基準($f0$)、open-close 基準($f1$)

②従属型入力パラメータ

最大許容変位量(MD) $MD=w0 \times G2$

時間刻み(Δt_{ave}) 接触中の経過時間を接触中の時間ステップで除したもの

以上のうち、 $kn, MD, \Delta t_{ave}$ が反発係数に及ぼす影響を調べた。なお、ここでは DDA の数値解析としての正しさを正解の98%値としている。

一連の実験の結果、 kn と MD 、つまりバネと許容変位量との間には、適切な組み合わせの範囲が存在すること、落下体の材料特性は重要だが反射板には依存しない、落下体によるバネは、鉄球>石であり kn は石の10倍必要と述べている。これは、ペナルティバネが質量に依存する性質を持つことを暗示している。

また、 kn と MD に小さな値を用いると反射板を通過し、大きくすると過剰反発や停止といった異常が発生しやすい、としている。

また、落下体の質量との関係では、落下体の密度が増加すると kn の値は増加することを述べ、 kn の適切な値は落下体のヤング率に依存する、としている。

一方、時間刻みとの関係では、 Δt_{ave} を $1.3 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-4} \text{sec}$ のように小さくすることで正解が得られるものの、この場合にも異常はみられ、このことから時間刻みを小さくすることは、解析を成功させる必要条件ではあるが十分条件ではない、と述べている。この

ほか、時間刻みを適切な値に設定するためには、最大許容変位量 MD を制御することが重要とも述べている。

以上のことから、DDA では時間ステップやペナルティバネの設定だけでなく、時間ステップに伴う変位の大きさも重要な要素であり、これが解析結果に大きく影響することがわかる。

(3) DDAball における時間刻みとペナルティバネとの関係(衝突時の特性)

布川(2006)は、DDAball における時間刻みとペナルティバネの関係について、先に述べたように Newmark β 法の特長という視点から、衝突時の時間刻みとペナルティバネの評価を行った[13]。DDAball と DDAoriginal は、剛体球と弾性体という違いはあるものの理論背景は全く同じである。ただし、接触時の判定に用いる変位比や貫入時の判定方法には違いがある。最も大きな違いは、接触時に一タイムステップあたりの変位が大きかった場合のタイムステップの短縮の方法であり、DDAoriginal が画面の $1/2$ の距離を参考にするという曖昧な定義を用いているのに対し、DDAball ではあらかじめ設定した許容変位とそのステップでの最大変位との比を用いるという点にある。さらに、DDAball では、貫入時の距離についても、あらかじめ設定した許容貫入量との比で制御している。このため、DDAoriginal にあった想定最大変位比の違いによる大きな変化がほとんどなくなり、接触探索範囲や貫入後の状況を時間刻みとペナルティバネの関係にのみ着目して解析することが可能となっている。

5.5 パラメトリックスタディにみるペナルティバネの傾斜反発特性

DDA の内部パラメータの決定方法は、石川らのパラメトリックスタディにみるように、落体の質量、時間刻み、ペナルティバネや変位比などが密接に関係するためその決定は容易ではない。

一方、落石シミュレーションでは、さまざまな角度と速度で衝突する球体と平面との接触問題に対して、安定した正解値を得る必要がある。すなわち、実務面からみるとはおおよそ $1\sim 30\text{m/sec}$ の速度と、入射角 $0\sim 90^\circ$ の範囲から飛び込む落石に対して、入反射速度と入反射角度、それに指定したエネルギー損失係数を基に、求められる解析解との一致が得られなければならない。ここでは、前節で述べた Δt 、ペナルティバネと質量間にある経験則をもとに、再度 DDA の各パラメータの特性を調べる。

本項では、以下の手順で検討を行う

(1) 時間刻みの決定

バネと時間の問題のうち、ここでは衝突時間に対する検討を文献をもとに行う。

(2) バネの決定

1) 垂直反発テスト

1m 四方の水平な壁要素に、直径 6cm の球体を高さを変えて、すなわち速度を変えて落下試験を行い、適切なバネを設定する。弾性反発を仮定し、速度比は 1.0 として、反射速度/入射速度が 1.0 に最も近い状態を再現できるバネを正解値とする。

2) 傾斜反発テスト

1) で決定したバネを基準として、傾斜衝突時のバネの特性を調べる。

反射板の角度を $15, 30, 45, 65, 75^\circ$ と変化させて、さらに落下高さを 1, 2, 3, 5m の 4 段階として、室内実験の再現を行う。この過程をバネを変えてテストし、傾斜反発に対するバネの特性を調べる。

3) 壁要素と球体の大きさによるバネの変化

ここでは、1) 同様、1m 四方の壁要素に、球体の大きさを変化させて垂直落下試験を行う。また、落下速度を 1, 5m の 2 段階とし、1), 2) で得た最適解を再現できる壁要素と球体間の関係を把握する。

以上の (1) (2) をもとに、DDAball における最適なバネの決定法について検討し、その後室内実験、現場実験の再現実験へと移る。

なお、DDA では、タイムステップ (Δt)、ペナルティバネ (K_n) とともに自動設定が可能であるが、本研究では時間刻みのみを自動としている。

5.5.1) 時間きざみの決定法

時間刻みは、DDA シミュレーションではもっとも重要なパラメータの一つである。DDAoriginal では、時間刻み決定困難な値であるとして、代わりに接触時の変位に応じて時間刻みを調整するため許容変位比(Displacement Allowed Ratio: DAR)を導入しており、時間刻みは自動とすることを推奨している。これにより、各ステップにおける時間刻みは、DAR により決定される。すなわち、時間刻みは、ステップ内での変位量が DAR よりやや小さい値になるように選ばれる。このとき、地表面と rock 間の距離は、 $2.5 \times \text{DAR} \times w_0$ で表される。 w_0 は、画面縦方向の距離の 1/2 であり、一般に 0.01~0.001 とされる。

マニュアルでは、時間ステップ毎にマトリックスを作成する陰解法を用いているため、時間ステップによる解への影響はないとされる(実際に影響はない)。このため、マニュアルでは、計算効率を考慮して当初の落石解析では、 $\Delta t=0.001$ 前後で解析が行われている。しかし、この値だと、内部処理で 1/3 に Δt を縮めても 0.0003sec 前後であり、これでは 20m/s で飛来する落石の 1 ステップあたりの変位は 6mm に達するため、落石を所定の範囲に捕らえきれないケースが増える。

一方、時間刻みは、質点解析では DSPS(右城)のように 0.01s とするケースが多いようであるが、DEM では 0.0001sec ~ 0.00001sec と小さくとられることが多い。DDA では、タイムステップが記述されることは少ないが、石川や布川らも $\Delta t=0.0001s$ と小さめにとっている。落石解析で扱う速度はおよそ 4~20m/s の範囲にあるから、0.0001s で解析を行うとすると、その 1 ステップあたりの変位は 0.04cm/s~0.2cm/s となる。

後述する実験に使用した室内実験では、 $\phi 5.8\text{cm}$ の球体を落下高さ 1~5m で落としているので、落下速度は 4m/s~10m/s である。ここで、 $\Delta t=0.0001\text{sec}$ とすると、変位は 0.04cm/s ~ 0.1cm/s となり、最大変位比は 10m/s のときに半径比で $0.1/2.9=0.034$ となる。本論文では、上記の検討をもとに、 Δt については 0.0001sec~0.00001sec を標準として検討に用いる。

5.5.2) ペナルティバネの性質と決定法

DDA で時間空間への離散化を行う際に用いるニューマーク法には、数値減衰が生じる場合のあることが指摘されている。布川は、この問題を DDAball を用いて調べ、減衰を抑制するためにはバネ(K)と時間刻み(Δt)と質量(M)との間で式(5.5.1)に示す条件を満たす必要があると述べている[13]。

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} < 0.05 \quad 5.5.1$$

ここに、 Δt は時間増分、K はペナルティバネ、M は物体の質量、T は固有周期である。本式は、減衰を抑制するためには、接触時の一周期に対して少なくとも 20 点以上の時間刻みが必要であることを示している。

1) 落石規模(質量)と時間刻みとペナルティバネ

式(5.5.1)は、 Δt が決定できれば、あとは質量とペナルティバネとの関係だけとなることを示している。落石シミュレーションでは、通常落石質量(M)はモデル化の段階で決定されているので、あとは時間刻み(Δt)を適切な値に設定できれば、ペナルティバネ(K)を自動的に決定できる。時間刻みを $\Delta t=0.00005\text{sec}$ とし、落下球の直径を0.06m, 0.20m, 0.50m, 1.00m, 1.50m, 2.00mとし、時間刻みを $\Delta t=0.00005\text{sec}$ 、および $\Delta t=0.001\text{sec}$ とした時の $\Delta t/T$ とペナルティバネとの関係を図5.5.2に示す。

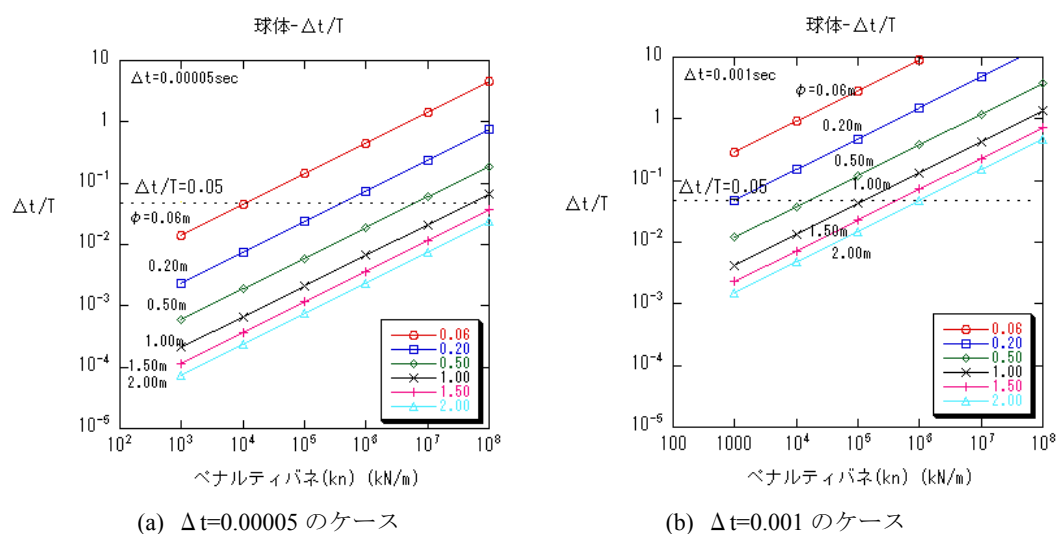


図 5.5.2 ϕ 0.06~0.80 の $\Delta t/T$ と kn の関係[14]

本図から、落石径が大きいほど大きなバネが必要となり、逆に落石径が小さい場合には小さなバネでも良いことがわかる。また、 Δt を大きくすると、グラフ全体が上にシフトする。このため、直径1.00mの球体で、 $\Delta t/T < 0.05$ となるペナルティバネは $\Delta t=0.00005\text{sec}$ のとき $3 \times 10^7\text{kN/m}$ であるが、 $\Delta t=0.001\text{sec}$ では 10^5kN/m となり、時間刻み(Δt)を大きくするとペナルティバネを小さくしなければならないこともわかる。

図5.5.2から、例えば、一般に落石シミュレーションの対象となる $\phi=1.0\sim 2.0\text{m}$ の球体では、 Δt を小さくする方が、バネの選択範囲が広がることがわかる。

5.5.3) 衝突速度のペナルティバネへの影響

式5.5.1は、質量とペナルティバネと時間刻みとの関係を示している。が、落石シミュレーションで最も重要な、速度に対する応答は不明である。そこで、図5.5.3に示すように、水平に置いた $0.2\text{m} \times 0.5\text{m}$ の壁要素に、球体を1, 2, 5, 15mの高さから落下させて、減衰に対するペナルティバネの影響を調べた。解析条件は以下に示すとおりであり、減衰の影響は速度エネルギー比(Ev)を1.0としたときの入反射速度の比(速度比(Rv))で評価する。

<解析条件>

$\Delta t=0.00005\text{sec}$

許容変位比(DAR)=0.001

直径 ϕ 60mm

質量 27kN

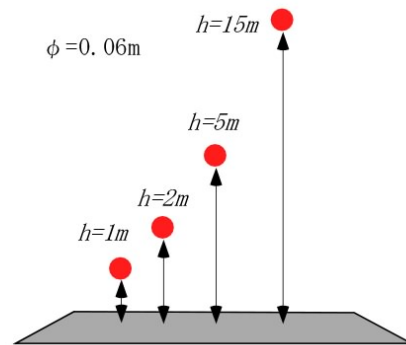


図 5.5.3 速度を変えた垂直落下実験

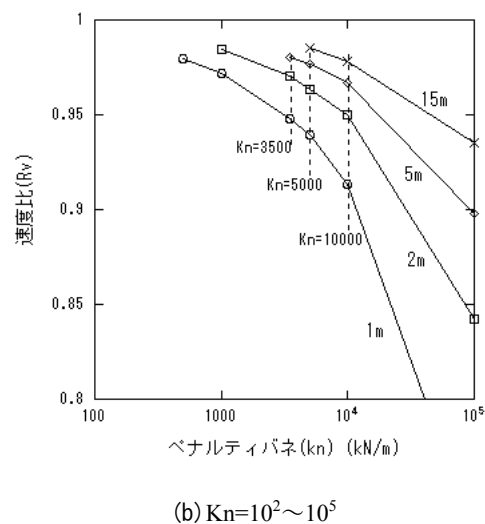
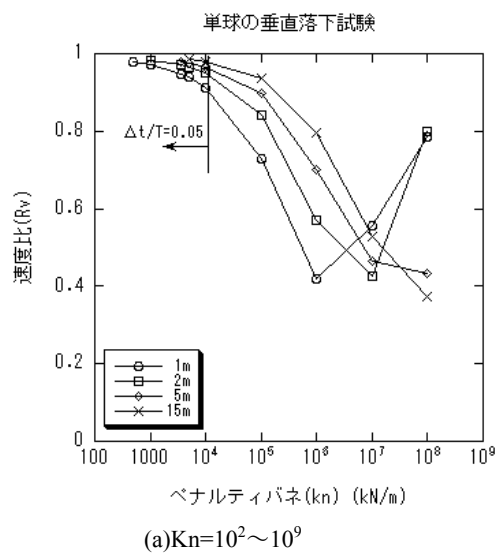


図 5.5.4 単球の速度を変えた垂直落下試験($\phi=58\text{mm}$) [14]

図 5.5.4 は、直径 58mm の球体を、落下高さ 1m($v=4.2\text{m/s}$)、2m(6.2m/s)、5m(9.9m/s)、15m(17.1m/s)と変えて落とした時、ペナルティバネの変化にともなう速度比の変化を表したものである。図 5.5.4(a)は、 $kn=3.5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^9 \text{kN/m}$ 間での落下高さ、すなわち落下速度と速度比との関係をみた図である。

本図から、衝突速度によらず、ペナルティバネが大きいほど減衰が大きくなること、その影響は衝突速度が遅いほど大きいことなどがわかる。そして、衝突速度によらず安定して正解の 90%以上を保持するためには、 $\Delta t/T < 0.05$ となる $kn=10000 \text{kN/m}$ 以下のバネを設定した場合であることがわかる。ただし、 $\Delta t/T < 0.05$ を満たしていても、速度が遅い場合は減衰が大きく、また速度が速い場合には、ペナルティバネを小さくしすぎると衝突時の解が

不能(Stay)となるケース生じる。

図 5.5.4(b)は、図 5.5.4(a)の拡大図であるが、本図は、落下高さ 5m では $kn=3500\text{kN/m}$ 以下で、また落下高さ 15m では $kn=5000\text{kN/m}$ 以下で解が不能(Stay 状態)となったことを示している。

以上の実験からみると、ペナルティバネは、落下高さ 15m、すなわち最大速度 17m/s のときの結果から、 $kn=5000\text{kN/m}$ と決定するのが適当と判定される。

なお、 $kn=5000\text{kN/m}(\Delta t/T=0.0322)$ を採用した場合も、速度比は 1m～15m に対して 0.94～0.99 で推移することとなる。これを $kn=10000\text{kN/m}(\Delta t/T=0.04554)$ と大きくすると、0.91～0.98 となり減衰は大きくなる。本結果から、ペナルティバネの探索法として、 $\Delta t/T<0.05$ で決まる kn 以下のバネを目安に、最大衝突速度に対して最も良好な結果を与えるより小さなペナルティバネを探索するという方法が推奨される。

DAR について(結果に対する改善案)

速度に起因する数値減衰の影響を改善する方法として、許容変位量(DAR)を小さくする方法がある。図 5.5.4A は、DAR を 0.001 から 0.0001 に下げた結果を示したものである。DAR=0.001 のとき、 $kn=5000\sim 10000\text{kN/m}$ で 91～99%であるが、DAR=0.0001 と 1/10 にすると、 $kn=5000\text{kN/m}$ のとき、落下高さ 1～15m の間でいずれも 99%と、解析解なみに向上する。

このように、バネには速度依存の傾向があるため、バネの設定とともに、DAR の設定は DDA の解析精度を保証するうえで重要である。これについては、後で別途記す。

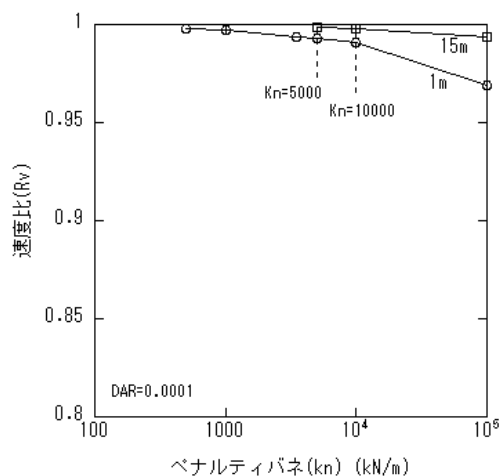


図 5.5.4A DAR を小さくしたときの変化

5.5.4 落石質量とペナルティバネとの関係

DDAball では、複数の径の異なる球体を扱うことが可能である．ここでは、地表面を表す壁要素の大きさと球体の質量(すなわち球要素の規模)との関係について試みる．球体の質量とペナルティバネと速度の違いによる関係を見るのが目的である．

実験は、壁要素の大きさを $1\text{m} \times 1\text{m}$ に固定し、球体の大きさを直径(ϕ)= 0.06m , 0.2m , 0.3m , 0.4m , 0.6m , 0.8m の 6 段階で行った．落下高さは、 1m (4.5m/s)と 10m (17m/s)の 2 段階である．なお、実験では回転エネルギー比は 1.0 とし、摩擦も 0° としている．

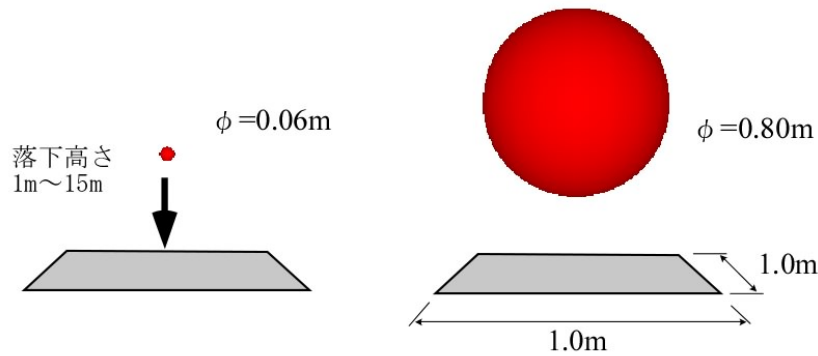


図 5.5.5 球の径と落下高さを同時に変化させた実験

本実験は、図 5.5.2 に示したように、球体径を大きくすればペナルティバネも大きくする必要のあることを確認するために行ったものである．

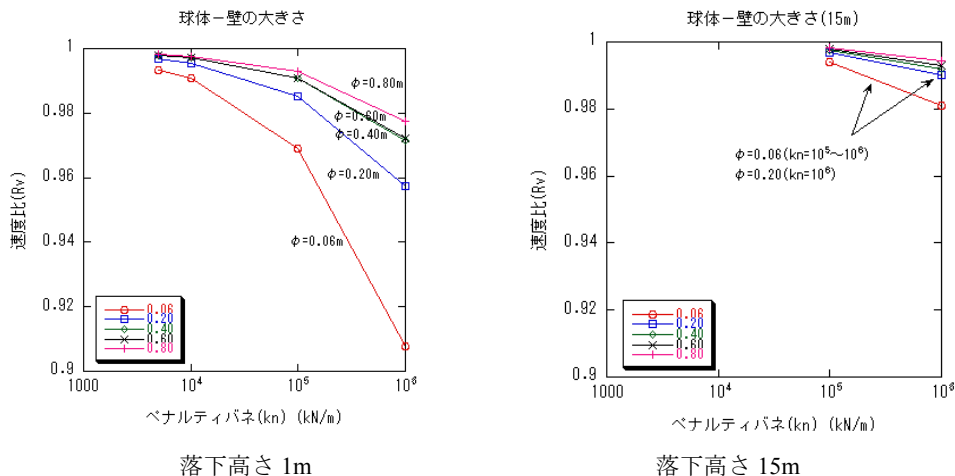


図 5.5.6 $\phi 0.06 \sim 0.80$ 球 落下高さ 1m , 15m での応答

図 5.5.6 は、落下高さ 1m と 15m のときの結果を比較したものである．縦軸は、反射速度/入射速度比(R_v)、横軸は、ペナルティバネを示す．なお、落下高さ 1m の速度は 4.05m/s ,

落下高さ 15m ときの速度は 17m/s である。

結果は、5.3.3 での実験同様に、ペナルティバネが小さくなるほど減衰の影響が減少している。また大きな球体ほど減衰の影響は小さいこともわかる。図 5.5.6(a)で $kn=10^5 \sim 10^6$ の $\phi=0.06\text{m}$ と、 $kn=10^6$ の $\phi=0.20\text{m}$ が $\Delta t/T > 0.05$ である他は、すべて $\Delta t/T$ は 0.05 以下である。本結果からは、速度が 4.05m/s のときは、 $\phi=0.06$ を除いてペナルティバネを 10^5 以下とすれば正解値の 98%以上の結果が得られることがわかる(もちろん、 $\phi=0.06$ の場合はさらにバネを下げればよい)。一方、速度が 17.05m/s と速くなるとこの結果は少し変わる。図 5.5.6(b)に示すように、各結果は右上方にシフトする。これは、バネの速度依存によるものである。そして、 $\Delta t/T$ が 0.05 より大きいにもかかわらず $kn=10^5 \sim 10^6 \text{kN/m}$ の間でいずれも 98%以上の精度を示している。

これらのことから、次のことがわかる。

(1)ペナルティバネは、時間刻みを 0.0005(DAR=0.0001)で一定とすると、 $\Delta t/T < 0.05$ の条件を満たすことが重要であり、このことは、球体規模を考慮してバネを決定しなければならないことを示す。よって、球体が大きくなればバネも大きくする必要があり、このことは壁要素の大きさとは無関係である。

(2)ペナルティバネを一定とすると、衝突速度が速いほど解析精度は良い。これは、速度が遅いと想定地表面下の停留時間が長くなり、数値減衰誤差が大きくなることが原因と考えられる。なお、速度 17.05m/s では、 $\Delta t/T > 0.05$ の $\phi=0.06$ と $\phi=0.20$ も 98%以上の精度を持っていて、速度が速くなると $\Delta t/T$ の影響が減少する可能性が伺える。

※ 本実験結果は、 $\Delta t < \text{DAR}$ の条件で行ったものであり、これを $\Delta t = \text{DAR}$ として実験を行うと、さらに解析精度は上がる。

5.5.5 傾斜衝突に与えるペナルティバネの影響

ペナルティバネは、時間刻みと質量の両方に大きく依存する。衝突速度による影響は、時間刻みによる影響に他ならない。ところで、冒頭で述べたように落石シミュレーションでは、入射角度は $0 \sim 90^\circ$ 、速度は数 m/s \sim 40m/s ほどの間で行われる。しかも、衝突時の速度比(R_v)や法線方向速度比(R_n)などには 4 章で述べたような、入射角度と入射速度に依存して変化する性質がある。この性質を考慮するためには、上記の角度と速度の範囲の衝突に対して、安定した、すなわち数値減衰を最小限にとどめられるパラメータ(Δt , M , ペナルティバネ)を選択しなければならない。

(1) 予備実験

ここでは、図 5.5.7 に示す衝突実験を行った。実験は、直径 0.06m の球体を、落下高さを 1m および 5m、また反射板の角度を 15° , 30° , 65° , 75° の 4 種類で行い、このときのペナルティバネと速度比(R_v)の変化について調べた。

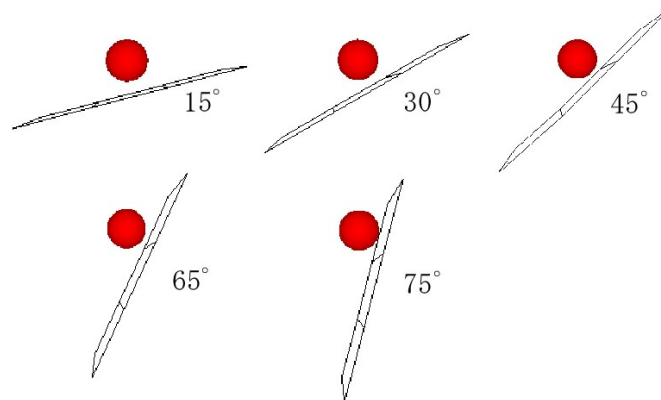


図 5.5.7 DDAball による傾斜衝突実験[14]

実験条件は、次のとおりである。

- ①鉛直ペナルティとせん断ペナルティは同じ値とする。
- ②時間は、0.0001sec とし、許容変位量を 0.0003 とした。
- ③接触検索範囲 0.1
- 許容貫入量 0.1
- Open-close 1×10^{-6}
- Close-open 1×10^{-4}

実験は、速度エネルギー比(Ev)を 1.0 とした完全弾性衝突として行い、結果は速度比(反射速度/入射速度)で表した。

図 5.5.8 に予備実験の結果を示す。図 5.5.8(a)は落下高さを 1m に、また図 5.5.8(b)は落下高さ 5m としたときの図である。縦軸は、入反射速度比(REv)であり、横軸は $10^3 \sim 10^9 \text{ kN/m}$ までのペナルティバネである。本実験結果は、次のようである。

- 1) ペナルティバネ(kn)の値が大きいほど減衰の影響が大きい。
- 2) 傾斜角度が低い、すなわち入射角度が大きいほど減衰の影響が大きく、逆に傾斜角度が高くなるほど減衰の影響は小さい。

本結果から、ペナルティバネには時間刻みや質量だけでなく、衝突角度による影響もあることがわかる。 $\Delta t/T < 0.05$ をペナルティバネの選択基準とすると、解析結果が 95%以上となるのは $\text{kn} = 10000 \text{ kN/m}$ 以下の、小さいバネを採用した場合ということになる。ちなみに、速度比が 95%と以上となる $\text{kn} = 10000 \text{ kN/m}$ のときの $\Delta t/T$ は 0.0019 である。

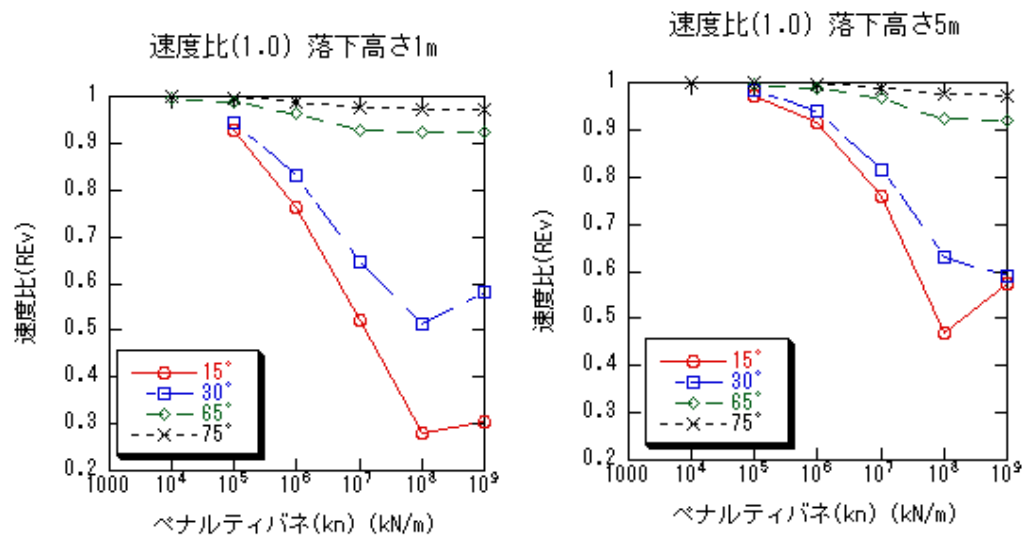


図 5.5.8 予備実験の結果

なお、 $kn=10^8$ 以上で減衰が回復傾向を見せる理由は不明だが、このとき $\Delta t/T$ は 0.6 以上であり、 $kn=10^{10}$ としても回復する訳ではない。なお、変位比(DAR)=0.0003 では低角度のときに STAY 状態となったためプロットしていない。これを改善するためには、前述のように変位比を 0.0003 より小さくするのが確実である。

次に、変位比(DAR)を 0.0001 として、さらに角度に 45° を追加し、落下高さを 1m, 5m, 15m の 3 段階とした場合の実験結果を述べる。

(2) 詳細実験 (DAR の影響を調べる実験)

予備実験結果を受けて、変位比(DAR)を 0.0001 とし(すなわち $DAR = \Delta t$), 落下高さに 15m を追加し、ペナルティバネを $10^3 \sim 10^6 \text{ kN/m}$ の範囲で実験を行った。結果を、図 5.5.9 に示す。

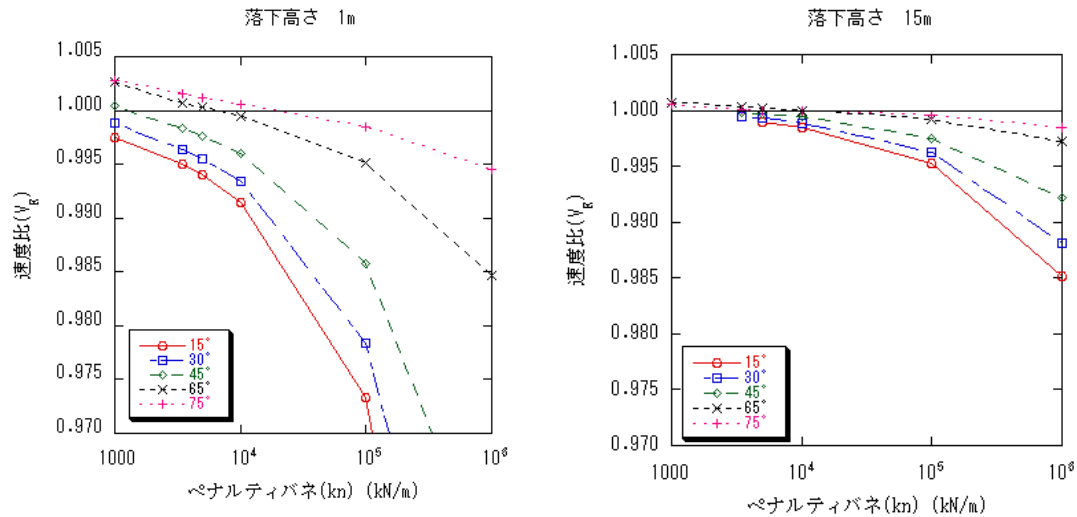


図 5.5.9 詳細実験の結果 [14]

図 5.5.9 と図 5.5.8 の違いは変位比を $1/3$ にして $DAR = \Delta t$ としたことにあるが、これによって低角度反射板で生じていた STAY 状態が改善され、いずれも解析が可能となっている。本結果から、ペナルティバネを $kn = 1 \times 10^4 \text{ kN/m}$ とすることで落下高さ $1 \sim 15 \text{ m}$ 、反射板角度 $15 \sim 75^\circ$ の解析に対して、99%以上の精度を保証できることがわかる。

本結果から、DDAball では、 $DAR = \Delta t$ とするのが適切であることもわかる。

一方、図 5.5.10 は、本実験において、 $kn = 10000 \text{ kN/m}$ を採用した場合と、 $kn = 1 \times 10^6$ とした場合の速度比への影響を、入射速度との関係で整理したものである。

本図は、ペナルティバネの違いが反射板角度の違いに与える影響を示している。

ただし、この違いは、実際の反射板実験の結果と同じ傾向を示しており、当然のことながら変位比を大きくとると、図 5.5.10 は右側の左下がりの傾向を持ちながら減衰は大きくなる。

以上の結果から、球体の径やペナルティバネに同じ値を用いても、衝突速度が遅くなると減衰が急増すること、その影響は入射角度が小さいほど大きいことが明らかとなった。しかし、ペナルティバネが $\Delta t/T < 0.05$ を満足する領域では、入射速度や入射角度によらず、減衰の影響を無視できる精度で解析できることも明らかとなった。

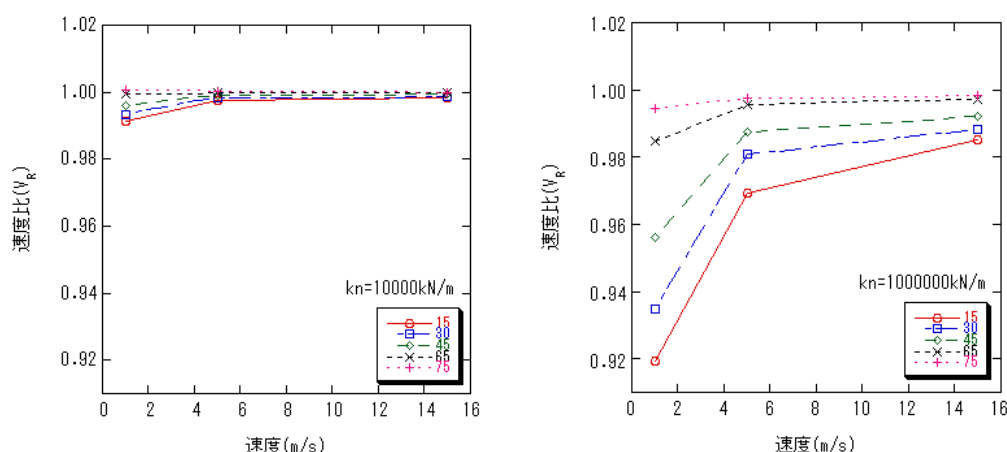


図 5.5.10 傾斜衝突実験における速度比と速度の関係
(ペナルティバネによる違い)

一方、注意したいのは、ペナルティバネのこのような入射角度に対する減衰傾向は、4章で述べた速度比そのものが持つ入射角度に対する依存性ときわめてよく似ている、という点である。このため、減衰の大きいペナルティバネを用いて解析を行うと、見かけ上非常に良好な結果に遭遇することがある。図 5.5.11 (a) は、同図に示した条件での解析結果で、 $\Delta t/T=1.34$ である。同図の (b) は、本傾斜衝突実験を図(a)のパラメータ設定で解析した法線方向入射速度と速度比の関係図であり、その分布は室内傾斜衝突実験結果と同じような分布を示す。ただし、入射角度 $15^\circ \sim 30^\circ$ にばらつきがあり、これがしばしば大きな反発の原因となっている。もちろん、結果は似てはいるが、ばらつきも大きく異常反発も多い。実際とはかけ離れた、誤った結論を出すおそれもあるため、注意が必要である。

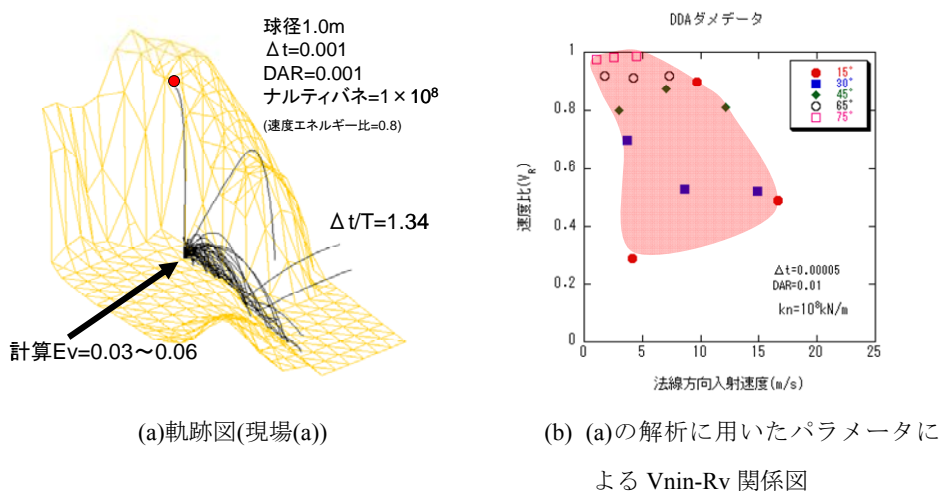


図 5.5.11 パラメータ設定 ($\Delta t/T > 0.05$) の良くない事例

5.5.6 許容変位比 (DAR) の影響

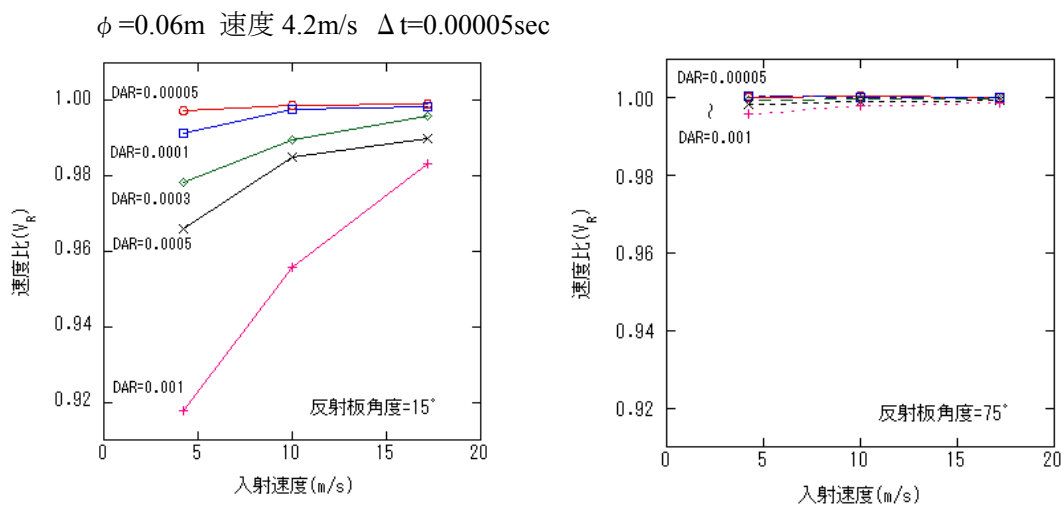
これまでの結果から、前述のような性質はペナルティバネの値だけで生じるものではなく、許容変位比によっても影響を受けることがわかる。許容変位比(DDA)は、DDAのマニュアルでは、0.001~0.01 の値が推奨されている。この入力値は、DDAoriginal では、画面の 1/2 の距離(W0)を乗じて lock 基準($2.5 \times W0 \times DAR$)に用いるとともに、ステップあたりの変位に対する低減に用いられる。

DDAball では、このとき実質的に DAR が時間刻みそのものとなる。落石解析の理想としては、衝突時には短い時間刻みを用い、飛翔中は大きい時間刻みを用いるのが理想である。しかし、入射角度と速度の範囲が広く、衝突だけでなく回転や滑り運動を含む場合への対応としては、実質的な解析スピードの低下は承知のうえで、 Δt を最初から小さくとる方がミスは少ないものと考えられる。

図 5.5.12 は、これまでの実験結果をもとに、減衰の大きい入射速度の低い方のケースから、入射速度 4.2m/s とし、 $\Delta t=0.00005\text{sec}$ として、DAR の変化による傾向をみた図である。反射板角度は 15° と 75° であり、DAR は 0.00005 から 0.001 まで 5 段階に変化させている。本図から、DAR を大きくすると、低角度反射板の特に速度の遅い領域に対して大きな減衰がはたらくことがわかる。この影響は、反射板角度が急になるほど小さくなり、 75° ではこの影響は無視できる。数値解析としての精度を 2%のずれ(減衰)までとすると、その精度を保証するためには、DAR を 0.0003 以下としなければならないことがわかる。

DAR は、このように、特に反射板角度が低角度で速度の遅いときに大きく影響するが、しかしあまり精度にこだわると、反射板が高角度のときに速度比が 1.0 を越える場合も出てくるので注意が必要である。本例からみる限り、 $\Delta t=DAR$ を基本とし、せいぜい $\Delta t < 3 \times DAR$ までを許容範囲と見るのが妥当と考えられる。

5.5.7 接触時間と計算回数の関係



(a)入射角度 15°

(b)入射角度 75°

図 5.5.12 入射角度 15° と 75° における DAR が減衰に与える影響 [14]

DDAでは、衝突が判定され接触がはじまるとopen-closeと呼ばれる判定が始まる。落石衝突の最初の判定でopen状態からclose状態に移行した後、次にclose状態からopen状態になり、落石が完全に抜け出すまでを1周期とすると、この間に要する全接触時間と計算回数もまた、ペナルティバネの値や衝突速度によって変化する。

図5.5.13は、反射板角度が15°，kn=10000kN/m，衝突速度4.2m/secのときの、接触時の速度，変位比D，そして貫入比の挙動を表した図である。

なお変位比Dは、以下で定義される。

$$\text{変位比} D = \frac{\text{1ステップあたりの最大変位}}{\text{許容変位(DAR)}}$$

接触と同時にopen状態からclose状態に移行し、徐々に変位比と速度を低減しながら、ある時点で上昇に転ずる。ここでは、速度比を1.0と入力しているため飛び込んだ時の速度とほぼ同じ速度でopen状態へと移行する。速度比(Rv)は0.9914であり、減衰はないとみなせる。このとき要した接触時間は、0.00055secであり、停留内での計算回数は267回である。DDAballでは、全体に、停留時間内での計算回数が多いほど減衰が小さく、速度比(Rv)は限りなく1.0に近づく。DDA(オリジナル)では、これほどの計算回数になることはなく、せいぜい10数回に留まるが、それでも計算回数の増加とともに速度比が1.0に近づく傾向は同じである。

図5.5.14は、衝突角度を15°と75°とし、それぞれの角度で衝突速度を4.2m/s, 10.0m/s, 17.2m/sとしたときの停留時間内の計算回数が、ペナルティバネによってどのように変化するかをみた図である。本図からは、ペナルティバネが大きくなるにつれて停留時間内での計算回数が激減すること、衝突速度が速いほど多くの計算回数が必要とすること、衝突角度による影響はさほどないこと、などが見てとれる。同時に、 $\Delta t/T < 0.05$ を満足し、高い精度で解析を行うためには相当量の計算回数が必要とすることもわかる。

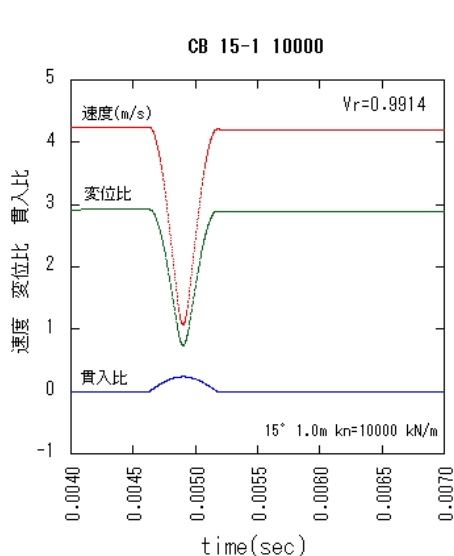


図 5.5.13 衝突時の速度，変位比，貫入比
の応答

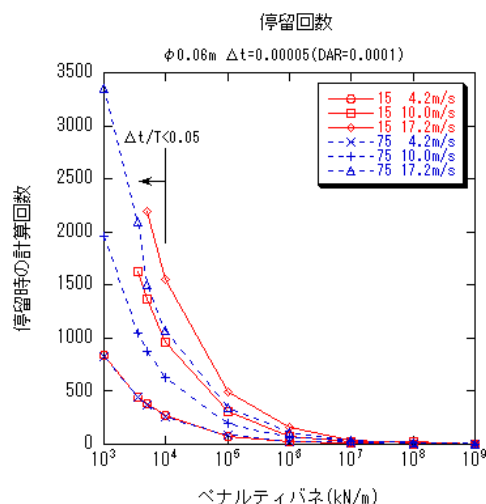


図 5.5.14 停留時間内での計算回数とペ
ナルティバネとの関係。

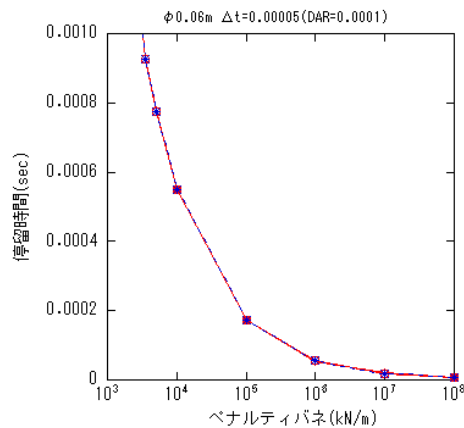


図 5.5.15 停留時間とペナルティバネとの関係

一方、図5.5.15は、同様の条件下で、停留時間とペナルティバネとの関係をみたものである。図中では15° と75°，4.2～17.2m/secのデータがほぼ重なっているため、1つの曲線のように見える。この図から、停留時間はペナルティバネの値によってのみ決定されることがわかる。

DDAballでは、ペナルティバネと許容変位比が決定されると、どのような速度と角度の衝突に対してもほぼ同じ停留時間で応答し、停留内での計算回数を衝突速度によって調節することで高い精度の計算を保証している。

以上のような機構からわかるように、適切な時間刻み、許容変位比、ペナルティバネが設定できれば、DDAballは落石の幅広い衝突速度や角度の変化に対し、十分に高い精度で解析を行うことが可能である。

< $\Delta t/T$ の推奨範囲について>

5.3章で、DDAの内部パラメータの設定に際して $\Delta t/T < 0.05$ が、ペナルティバネを決定するための目安となることを述べた。一方、5.5章ではペナルティバネ、パラメトリックスタディにより入射速度と入射角度が対する応答を述べた。

5.3末(P230)で述べたように、 $\Delta t/T < 0.05$ という目安値はニューマーク β 法の β γ の理論曲線で説明される。しかし、そこでも述べた様に、布川が行った実験では $\Delta t/T$ が0.05のときのE2/E1の値は0.6前後、すなわち正解値の60%ほどの値であり、 $\Delta t/T$ はさらに小さな値でなければならないことになる。この原因としては、理論とプログラミングの違い、あるいはDDAの接触機構の特性などが可能性として考えられる。実際、衝突角度と衝突速度を変えたパラメトリックスタディでは、入射角度や入射速度によって減衰の影響が大きく異なることもわかった。そこで、実験結果を、今一度、スペクトル半径(E2/E1)と $\Delta t/T$ との関係で再整理した結果を図5.3.16に示す。

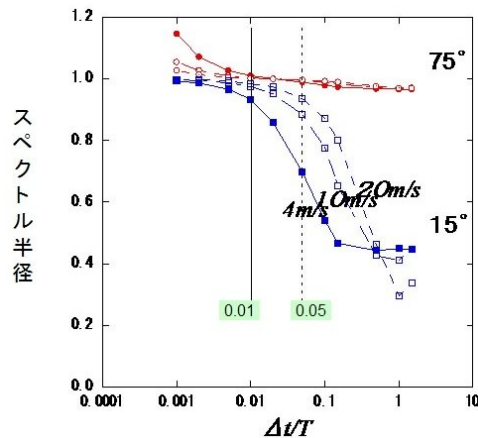


図 5.3.16 スペクトル半径と $\Delta t/T$ (入射角度と速度の影響)

本図から、入射角が75°になると $\Delta t/T$ によらずほとんど減衰がなく、むしろ0.01以下で増える結果となっている。また、15°のケースでは速度の影響が大きく表れ、 $\Delta t/T=0.05$ では入射速度が10m/s以上のときは0.9以上だが、4m/sになると0.7以下まで低下する。原因は不明だが、本図から、布川の実験結果の曲線が $\Delta t/T=0.05$ のとき0.6前後であったのは、その実験条件が入射角0°、入射速度3.13m/s(落下高さ0.5m)であったことによるとためと考えられる。

本結果からみる限り、現在のDDAballでは $\Delta t/T < 0.05$ というのは目安としては大きく、むしろ $0.01 < \Delta t/T < 0.02$ とするのが適切といえる。

5.6 5章のまとめと内部パラメータの決定法

4 章では、不連続変形法(DDA)を、落石シミュレーションに適用するエネルギー損失を表す係数の性質と、その適用方法について検討した。しかし、3 章で述べたように、シミュレーションを成功させるためには、これとは別に解を安定かつ精度よく解くための基本的な設定も重要である。DDA では、動的静的スイッチ、時間刻み(Δt)、ペナルティバネ(k)、許容変位比(DAR)などがこれにあたり、内部パラメータとも呼ばれる。

本章では、5.1 で、DDA において近年指摘されているこれらの設定がもたらす数値減衰に関する近年の研究結果をまとめた。

5.2 では、本研究で用いた、三次元剛体球要素 DDA(DDAball)について解説した。3 章で述べたように、衝突時の形状によるばらつきを避け、速度比(Rv)の法線方向入射速度依存性を精度よく評価するためには、落石は球体であることが望ましい。加えて、本手法は三次元解析であり、球体を集合体として岩塊の形状を表すこともできることから、落石解析に適した解析法といえる。

一方、5.3 および 5.4 では、DDA の安定性、解析精度に大きな影響を与える要因について説明した。

DDA では、時間方向の離散化にニューマーク β γ 法が用いられる。 $\beta=0.5$ 、 $\gamma=1.0$ であり、理論的には安定かつ高精度と考えられる本手法にも、内部パラメータを設定する際には一定の関係を満たす必要のあることが指摘されており、その解決方の一案として、布川は Hughs による経験式として、 $\Delta t/T < 0.05$ をあげている。ただし、本研究で行った結果、目安としては以下とすることが推奨される。

$$0.01 \leq \left\{ \frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \right\} \leq 0.02 \quad 5.6.1$$

ここに、 $\Delta t/T$ は振動の1周期を表し、 Δt は時間刻み、 K はペナルティバネ、 M は質量を表す。本研究では、この式をもとに、衝突時の速度と角度に対するペナルティバネの性質を調べ、ペナルティバネの次のような性質を明らかにした。

- ① 時間刻み(Δt)を一定とすると、ペナルティバネは球体規模に合わせて決定しなければならない。
- ② 時間刻み(Δt)一定、球体規模が一定なら、ペナルティバネが大きいほど、つまり $\Delta t/T$ が 0.05 より大きくなるほど、大きな減衰が生じるようになる。また、減衰の影響は速度が遅いほど大きく、逆に速度が速くなると小さい。
この性質は、速度比の速度に対する性質とは逆である。
- ③ 時間刻み(Δt)一定、球体規模が一定、かつ入射速度が一定なら、ペナルティバネが大きいほど、つまり $\Delta t/T$ が大きくなるほど、減衰の影響は入射角度が小さい方に表れる。逆に、入射角度が大きい場合には減衰の影響は小さい。

この性質は、速度比の入射角度に対する性質に近い。

この③の性質が、適当な設定でも、あたかも実際であるかのような落石の振る舞いに結びつくことがある。注意が必要である。

以上の結果をもとに、本研究ではDDAballを落石解析に適用する際の内部パラメータの設定法を提案した(図5.4.16)。

落石解析では、通常落石規模は調査結果に基づいて最初に決定される。

Δt は、落石の速度を考慮して0.0001sec以下と設定する。時間刻み(Δt)は、接触可能性判定時に許容変位(DAR)に置き換わるため、 $\Delta t = \text{DAR}$ とし、それぞれの値を、従来いわれていた値よりも1桁小さくとることとする。これにより解析スピードは大きく低下するが、高速で飛び込む落石の変位を追跡するためにはやむを得ない。ただし、このことにより、壁要素の貫通や跳ね返り速度の著しい超過はほとんど見られなくなる。すなわち、比較的安定して解が得られるようになる。

ついで、式5.6.1をもとに、ペナルティバネの上限を決定する。およそ1000kN/mのオーダーで十分と考える。

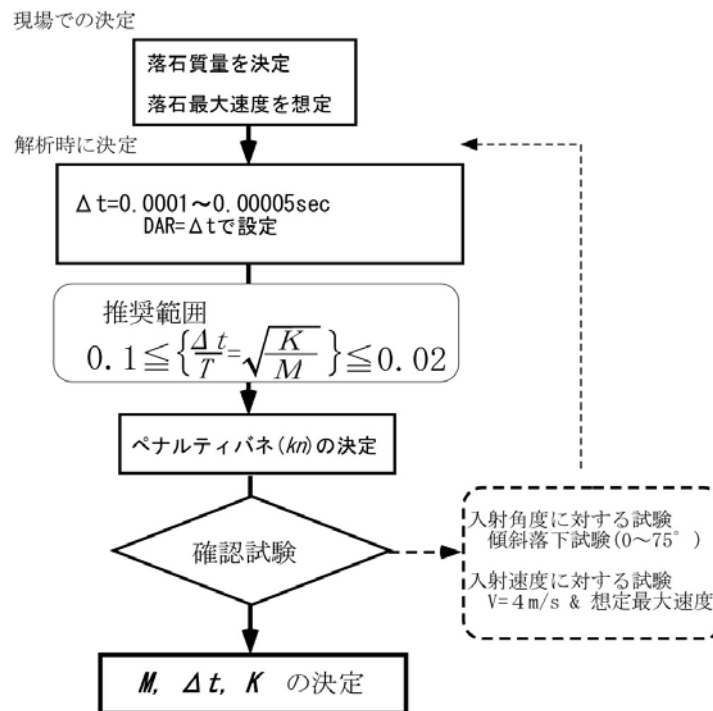


図 5.4.16 DDAball における内部パラメータの設定手順

なお、このまま、本解析に移っても、問題を生じることは少ないが、念のため決定したペナルティバネを用いて、垂直～傾斜落下解析実験、入射速度に対する試験を行っておくとよい。判定は、速度比(or速度エネルギー比)の値を1.0として、入反射速度の比で行う。

入射速度は本研究で用いた4m/secとしたが，これは落下高さ約1mに相当する．最大速度でもテストするのは，解析時に生じるstay状態を防ぐためにバネの下限を求めるためである．また傾斜落下試験は，バネの値によっては高い傾斜角度で生じやすいover状態を防止するためである．

以上のようにして，モデルの大きさと精度を考慮したDDAの解析内部パラメータが決定されると，精度を保証した解析が可能となる．

次章では，4章で明らかとなった速度比の法線方向速度依存性を組み込んだDDAballを用いた室内実験結果の再現解析を行う．

第5章 参考文献

- [1]Guangqi Chen & Yuzo Ohnishi : Slope stability analysis using discontinuous analysis method, Proceedings of the 37th U.S.Rock mechanics symposium ,Vol.1, 1999,6.
- [2]Masto Shinji, Hiroyuki Ohno, Yasunori Otsuka, Guichen Ma : Viscosity coefficient of the rockfall shimulation, Proceedings of ICADD-2, 1997.
- [3]Ohnishi,Y.,Nishiyama,S.,Sasaki,T.,and. Nakai,T : The application of DDA to practical rock engineering problem, issues and recent insights, Int.Proc.of the 7th Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-7), pp.277-287, 2005.
- [4]大西有三, 佐々木猛, Gen-Hau shi, 不連続性岩盤解析実用化研究会 :不連続変形法(DDA), 計算力学レクチャーシリーズ 6, 計算工学会編, pp.56-58 ,2005.
- [5]不連続性岩盤解析実用化研究会 : DDA(200609)Version06-1.01 解説書・入力マニュアル, 第 28 回, 9,2006.
- [6]M.Tsesarsky, Y.H.Hatzor, N.Sitar : Dynamic block displacement prediction – Validation of DDA using analytical solutions and shaking table experiments, Stability of Rock Structures, Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 519 3.2002.
- [7]大西有三, 西山哲, 三木茂 : 3 次元粒状体 DDA とその応用, 計算工学講演論文集, Vol.8,2003.
- [8]布川哲也, 大西有三, 西山哲, 楊萌, 三木茂:落石シミュレーションのための三次元不連続変形法(DDA)の研究, 計算工学会講演論文集, Vol.9,2004
- [9]布川哲也, 楊萌, 大西有三, 西山哲, 三木茂 : 不連続変形法(DDA)を用いた 3 次元落石解析に関する研究, 第 33 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.469-474,2004.
- [10]不連続変形法による 3 次元落石解析事例:荻原育夫, 三木茂, 佐々木猛, 西山哲, 大西有三, 計算工学会講演論文集, Vol.9,2004
- [11]Ishikawa,T.,Miura,S., and Ohnishi,Y. : Influence of input parameters on energy loss in free fall test with DDA, Int.Proc. of the 7th Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-7), pp.148-158, 2005.
- [12]石川達也 : D D Aによる自由落下試験のエネルギー消失における入力パラメータの影響, 第 27 回不連続性岩盤解析実用化研究会, 2006.
- [13]布川哲也 : 不連続変形法の岩盤動的問題への適用に関する研究 : 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻修士論文, 2006.
- [14]島内哲哉 : DDAによる落石解析時のばねの設定に関する研究, 第28回不連続性岩盤解析実用化研究会, 2006.

<空白>

第6章 DDAの落石解析への適用性に関する研究

落石が衝突する際の入射速度の比(速度比(Rv))には, 法線方向入射速度に依存する性質がある. 4章では, この特性を DDA に導入するために, Pfeiffer(1989)らの SF 曲線法を援用する方法を提案した. 一方, 数値解析法の落石解析への適用時にしばしば指摘されてきた内部パラメータの性質について5章で述べ, その実用面での設定法について述べた. 本章では, この提案をもとに, DDAball による落石解析への適用性を検証する.

6.1 速度比の法線方向入射速度依存性(SF 曲線法)の導入

6.1.1 DDAball への SF 曲線法の導入

Pfeiffer らの式をもとにした速度比の SF 曲線法は, 以下のように法線方向入射速度を関数とした式(スケールファクター:SF)を用いている[1]

$$SF = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{nin}}{K} \right)^2} \quad 6.1$$

この式は法線方向入射速度, すなわち衝突時の角度と速度を必要とする. 一方, DDAball では, Δt 刻みの各計算毎に球体と壁要素との接触判定を行うが, 速度エネルギー比(速度自乗比)は, 最初に接触と判定された時に1度だけ導入される. 入射角度は, この接触直前の球体の速度ベクトルと, 接触する壁要素に立てた法線方向ベクトルから, 式 6.2 によって算定される.

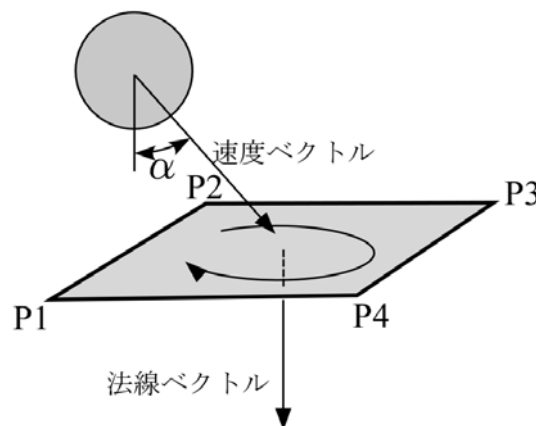


図 6.1.1 DDAball における入射角度の判定

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{P \cdot V}{PV} \right)$$

$$= \cos^{-1} \left(\frac{P_x V_x + P_y V_y + P_z V_z}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}} \right) \quad 6.2$$

一方、DDA 自体は弾性計算であるため、入反射角の関係は完全弾性反発である．このため、非弾性反発を DDA に強制的に導入するためには、4 章で述べた入反射角度による補正式を導入する必要がある．これは法線方向速度比(Rn)の導入を意味するが、本研究では、速度比(Rv)の法線方向入射速度依存の確認を目的としているため、角度の補正は行わない．

6.1.2 SF 曲線における Rv(s) と K の役割

SF 曲線法は、起点となる Rv(s) と同時に補正速度比(K)の 2 つのパラメータで構成される．ここでは DDA を用いて、傾斜 15° の反射板に、直径 58mm の球体を落下させたときの反射軌跡の結果をもとに、それぞれのパラメータの性質と法線方向入射速度依存の性質を説明する．なお、速度比と反射時の距離、高さはほぼ比例関係にある．

通常速度比は $0 < Rv \leq 1.0$ の間で用いられる．図 6.1.2 は、SF 曲線法の補正速度を $K=10\text{m/s}$ に固定し、速度比(Rv(s))を 0.4,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0 と変化させたときの反射軌跡図を示した．同図には、 $Rv=1.0$ として、依存性を考慮しない場合の曲線も示している．本図から、SF 曲線法を導入すると、導入しない場合に比べて反射後の到達距離が大きく減少すること、その割合は $Rv=1.0$ の時ではほぼ 60%、 $Rv=0.9$ (速度エネルギー比=0.81)のときにはほぼ 50%になり、以後、速度比(Rv(s))の低下にしたがい大きく低下していく．

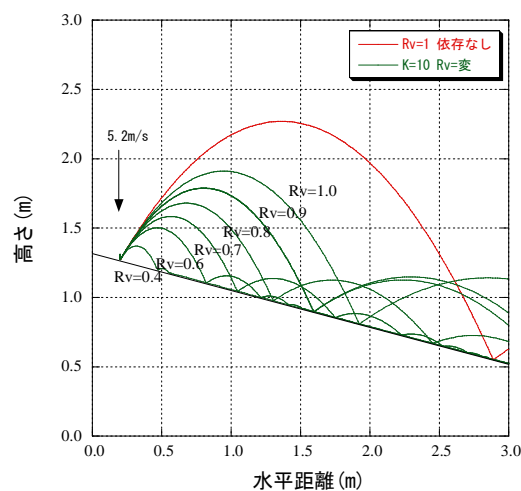


図 6.1.2 SF 曲線の Rv(s)による変化(K=10 に固定)

一方、図 6.1.3 は、 $R_v=1.0$ のまま補正速度(K)を、6,8,10,12,14,20,30 と変化させた図である。同図にも、 $R_v=1.0$ として依存性を考慮しない場合の曲線を示した。SF 曲線法を導入すると、考慮しない場合の 60%前後の軌跡となることは図 6.1.2 と同じである。ただし、 K の影響がおおよそ 6~14 の間でほぼ比例的に減衰する一方、 K の値を 20 以上にしても SF 曲線を導入しない場合にまでは戻らない。本図の結果から、補正速度(K)は、飛距離を調整する性格のパラメータであること、その値はせいぜい $5 < K < 20$ 程度の範囲であることがな

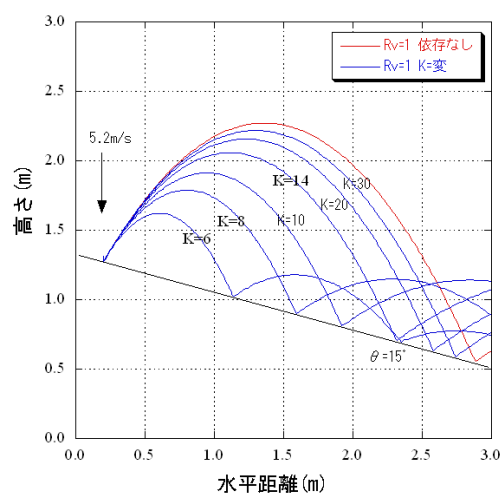


図 6.1.3 SF 曲線の K による変化($R_v(s)=1.0$ に固定)

以上、SF 曲線法は、法線方向入射速度の依存性を考慮しない場合に比べて、 $R_v(s)=1.0$ 、 $K=10$ のとき速度比と反射距離をほぼ半減させる(ただし、入射角 30° の場合)。補正速度 K を 10 以下にすると速度比は減少し、 $R_v(s)$ を下げた場合に近い効果を与える。一方、速度比 K を大きくすると、反射距離も延びる。

4.5 では、室内実験の結果をもとに $R_v(s)$ は基本的に 1.0 に近い値をとり、補正速度 K は反射地点の地盤の性状によって変化すると述べた。しかし、その一方で実際の現場において、入射角度の大きい領域では R_v は予想以上に低い場合もあり得ることを示した。このことは、SF 曲線の $R_v(s)$ も 1.0 以下の値をとる可能性があることを示している。 $R_v(s)$ と K の組み合わせは、今後、実際の現場への適用をみながら探っていかなければならない。

6.2 室内実験結果の再現解析にみる SF 曲線法の効果

速度比の法線方向入射速度依存性を導入した DDAball を，4 章で述べた室内実験結果の再現解析に適用する．

4 章では，花崗岩製と木製反射板の 2 種類の反射板に径 5.8cm の石英球を落下させて，入射角度と入射速度により変化する速度比を計測した．入射角度は， 15° ， 30° ， 45° ， 55° ， 65° ， 75° の 6 ケースであり，入射速度の変化は 4.42m/s, 6.26m/s, 7.69m/s, 9.89m/s の 4 ケースである．

この，結果を Pfeiffer 式を援用した反射速度の予測式を用いて，入射速度の結果を比較したのが図 6.2.1(再掲)である．図中では，後述する SF 曲線(提案法)による再現結果と比較するために，入射角度別に記号を変えてプロットした．本図から，入射角度が大きいほど再現性が高いこと，これに対し入射角度が小さくなるほど予測値>実測値の関係となる，すなわち速度比を過大評価しやすいことがわかる[2]．

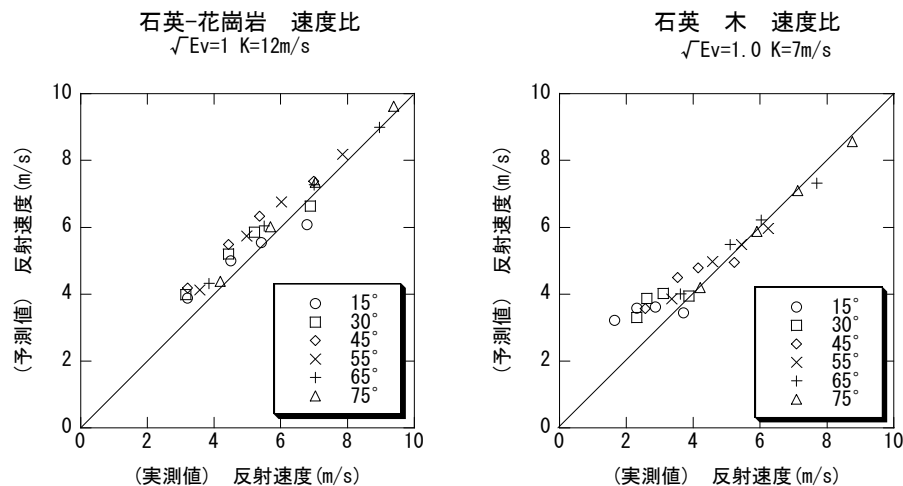


図 6.2.1 反射速度の予測-実測対比図．(岩製および木製反射板と石英球の室内落石実験結果)

速度比の SF 曲線法は，速度比と法線方向入射速度との関係を，SF 曲線上で補正する方法である．したがって，実験結果に基づく入射速度を入力値として解析を行った場合，解析結果の速度比がこの SF 曲線上で求められれば，DDAball 内部のパラメータの設定，SF 曲線ともうまく設定されたということになる．

一方，図 6.2.2 および図 6.2.3 は，図 6.2.1 の基データ，すなわち石英球と各反射板の速度比と法線方向入射速度との関係を示した図である．図中には，それぞれ，求めた速度比の SF 曲線を示している．また，この SF 曲線には，速度比の SF 曲線法を導入した DDAball を用いて予測した速度比をプロットした．なお，この結果は，角度別に記号を変えて示し

ている．本図から，DDAball による解析結果が SF 曲線上で再現されている様子がわかる．ちなみに，タイムステップを 0.0003 とした場合の相関係数は，岩製反射板で $r=0.94$ ，木製反射板で $r=0.96$ である．より相関性を高めるためには，5 章で述べたように， $\Delta t=DAR=0.0001$ とすればよい．

本結果からは，速度比(R_v)の SF 曲線法による予測法の特徴も明らかである．すなわち，

- 1) 入射角度が小さく，入射速度が遅いほど速度比が過大評価される傾向がみられる．この傾向は， 45° 以下で顕著で， 45° 以上で少ない．
- 2) SF 曲線において，計測値 15° より下側にプロットされるケースは，本来は下限値以下として処理されなければならない．すなわち，計測値の下限値以下の値はうち切る処理が必要となる．

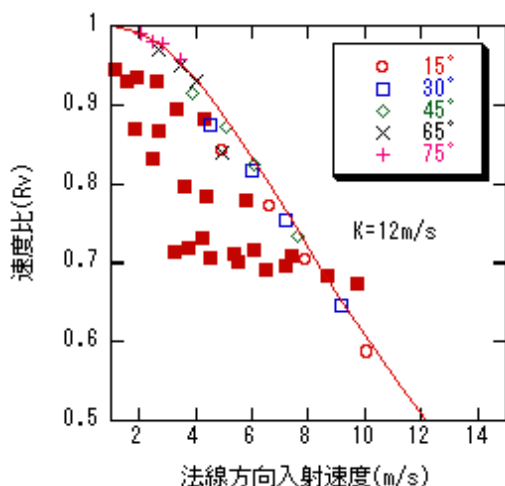


図 6.2.2 岩製反射板の R_v - V_{nin} 関係図と SF 曲線および DDAball 解析結果

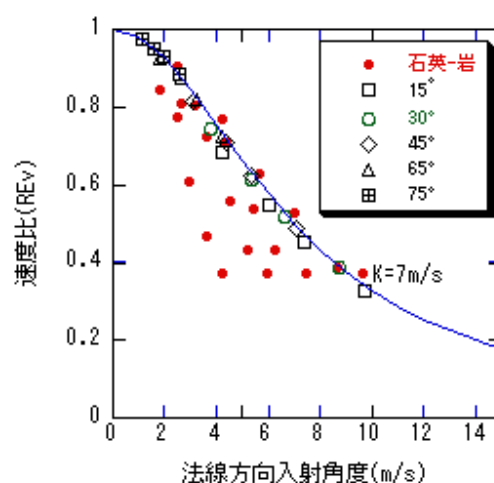
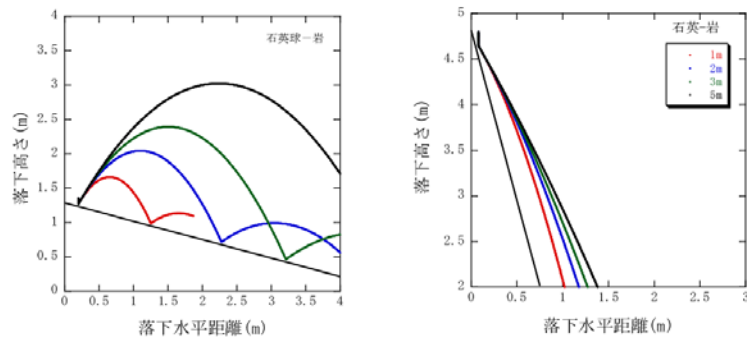
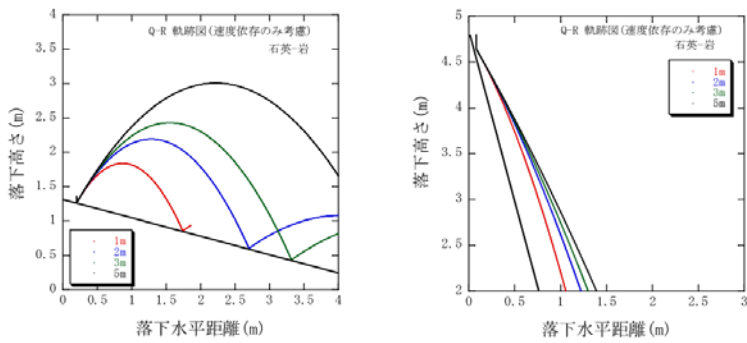


図 6.2.3 木製反射板の R_v - V_{nin} 関係図と SF 曲線および DDAball 解析結果

一方，この結果を用いて実測値で解析した結果と速度比の SF 曲線法による効果を入射角度が 15° と 75° のときの軌跡で比較したのが，図 6.2.4 と図 6.2.5 である．本図から，反射板が 75° のときの軌跡は，反射板によらずほぼ実際と一致するが，反射板が 15° のときに再現性が劣ることがわかる．いずれも，速度が速い部分での軌跡はほぼ一致するが，速度が低くなると特に木製反射板で実測を上回るようになる．すなわち，速度比を用いた SF 曲線法では，入射速度が小さいほど，また入射角度が小さいほど速度比は過大評価される傾向にある．この傾向は，4 の実験結果の項で述べたように，反射板が軟質な場合に対する非弾性衝突の特徴ともいえるものであり，この点は適用上の留意事項である．この点は，式 6.1 中の補正速度(K)で補正することになる[2]．

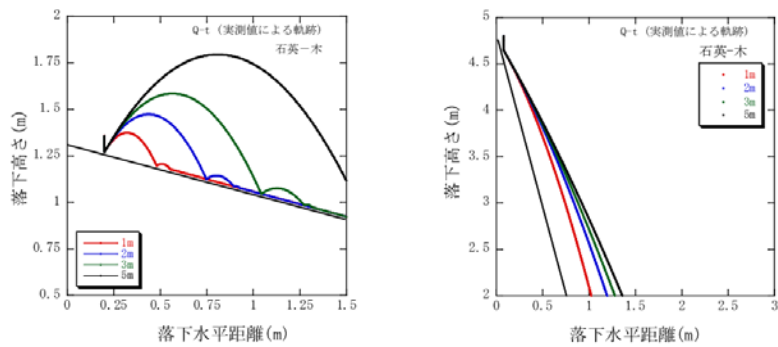


(a) 実測値による再現軌跡

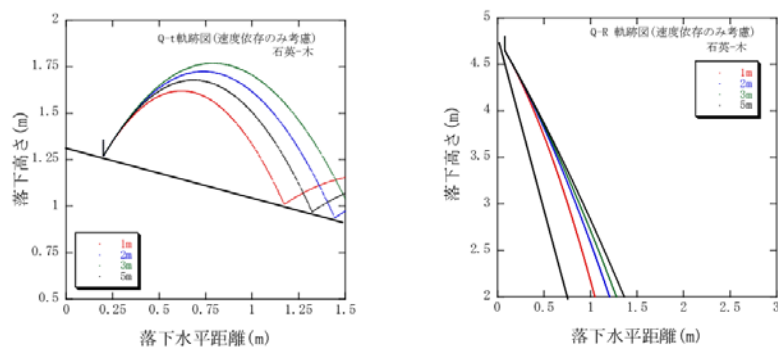


(b) Pfeiffer式による再現軌跡

図 6.2.4 石英球-岩製反射板 反射板 15° および 75° の軌跡比較図



(a) 実測値による再現軌跡



(b) Pfeiffer式による再現軌跡

図 6.2.5 石英球-木製反射板 反射板 15° および 75° の軌跡比較図

6.3 SF 曲線法による現場実験結果の再現解析

6.3.1 現場(a)への適用事例

(1)現場(a)の概要

本現場は、4章で述べた、落差15～16mの急崖上にあるオーバーハング岩塊の除去現場からの岩塊落下を観察・計測した現場である。3章では、地形が酷似する現場(b)とともに、二次元DDAと質点解析を適用した結果、粘性係数、法線方向速度比(R_n)、速度エネルギー比(速度比の二乗)のいずれを用いても、現状のままでは計測結果の再現は困難と結論づけた現場である。ここでは、現場(a)の再現解析に、速度比によるSF曲線法を導入したDDAballを用い、その効果と適用性を検証する。

(2)速度比とSF曲線

観察では、最初の落下地点a1地点に14～18m/s(入射角度 $20^\circ \sim 30^\circ$)の速度で衝突した岩塊は、2～4mを跳んでa2地点でバウンドした後、平均傾斜 30° あまりの岩砕上を小さくバウンドしながらころがる。計測した岩塊(14個)の大半は斜面の1/2ほどで止まり、残りは末端に設けた堤に衝突して止まる。a2地点への入射速度は5～10m/s(入射角度 $40^\circ \sim 60^\circ$)であり、堤への衝突する直前の速度は1～2m/sである。

解析に用いたSF曲線は、図6.3.1(a)(再掲)に示すSF曲線(1) $R_v(\text{scaled})=1.0$, $K=10\text{m/s}$ と、SF曲線(2) $R_v(\text{scaled})=1.0$, $K=12\text{m/s}$ の2つである。SF曲線(1)は、a1地点の平均を通るように、またSF曲線(2)は、a1,a2の2つの両方の平均を通る曲線である。

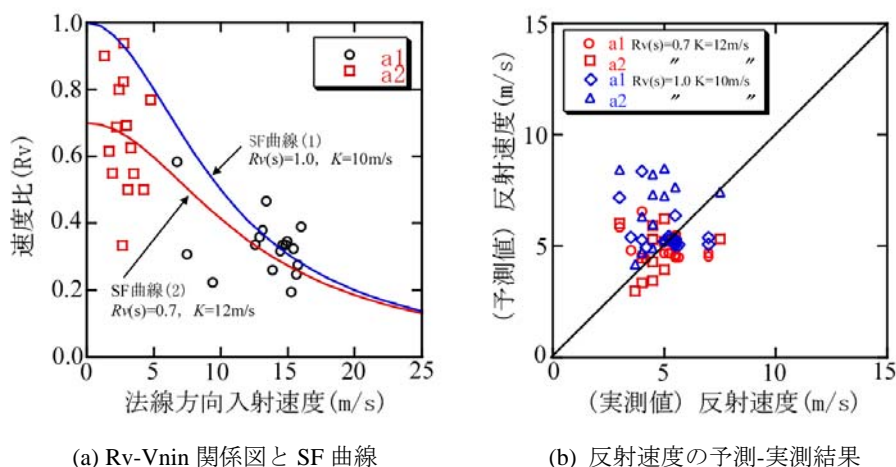


図 6.3.1 現場(a) 解析に用いた SF 曲線と反射速度り予測実測対比図[1]

この2つの曲線による反射速度の予測結果は、図6.3.1(b)(再掲)に示すとおりである。図6.3.1(a)において、分布の最大側を通るSF曲線(1)では、予測値の多くが実測値を上回る。一方、a1地点の平均を透るように設定した曲線(2)では、a1地点では予測値>実測値と

なるものも多く、逆に a2 地点では予測値<実測値となるものが多い。ただし、その差は曲線(1)に比べて小さく、このため見かけ上は曲線(1)より曲線(2)の方が再現性は良好である。SF 曲線を、最大、平均のいずれでとるかは課題の 1 つであるが、そのばらつきの考慮も必要であることがわかる。

(3)DDAball による再現解析

DDAball は三次元の落石解析コードである。このため、地形モデルは三次元平面要素で作成しなければならない。地形モデルは、3 章で説明した等高線からの作成方法を用い、1m 間隔の平面等高線図から作成した。すなわち、1m 間隔の等高線 CAD データをもとに、一度、汎用モデラーソフトで 1m 間隔の格子枠平面を作成してその頂点座標を出力、これを DDAball の入力書式に変換して地形データとする方法である。なお、落下岩塊は、計測岩塊のほぼ平均である半径 0.35m の球体でモデル化した。

一方、三次元解析では衝突地点の平面要素の傾きによって落下方向や反発高さが変化するため一ケースだけの解析では、実祭の広がりや速度などとの整合性を判断しにくい。このため、本解析では落下開始位置での平均初速(1.8m/s)の水平方向成分に対し $\pm 0.5\text{m/s}$ の変化を与えた。解析に用いた入力値を、表 6.3.1 に示す。なお、 $\Delta t/T=0.049$ である。

図 6.3.2 には DDAball で得られた解析結果の軌跡図を、また図 6.3.3 には速度軌跡と、a1,a2 地点での実測と解析から得られた速度比(Rv)の結果を示した。なお、解析は 1 ケースあたり 50 回行い、軌跡と速度軌跡図には 5 ステップおきの結果を示している。速度比(Rv)の結果も、ばらつきを考慮した表示とした。

表 6.3.1 現場(a)の入力パラメータ

入力項目	入力値
落石質量	470kg
密度	$2.62 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
摩擦角	30°
$\Delta t \text{ (sec)}$	0.00005
ペナルティバネ (Kn)	$1.8 \times 10^7 \text{kN/m}$

本現場では、速度軌跡を斜面末端まで計測していないため、実際の軌跡との正確な対比は困難であるが、落石の到達地点やそこでの速度からみると、SF 曲線(1)では速度が大きすぎ、かつ遠くに跳びすぎる。これに対し SF 曲線(2)では、停止位置が実際よりもやや手前側にあるものの、ほぼ実際に近いと判断される。

図 6.3.3 において、a1,a2 地点での速度比をみると、SF 曲線(1)では、a1 地点の実測値($Rv=0.33 \pm 0.09$)に対して、解析結果は $Rv=0.38 \pm 0.12$ と良好である。しかし、a2 地点では実測値($Rv=0.66 \pm 0.12$)に対して、 $Rv=0.92 \pm 0.05$ と著しく大きい。この a2 地点での速度比の高さが、速度と到達距離を実際より大きくした原因である。このことから、少なくとも本事

例では, a2 地点での速度比を実測に近づけるためには, 室内実験結果とは異なり $Rv(scaled)$ を 1.0 以下とすることが望ましいことがわかる.

一方, SF 曲線(2)では, a1 地点の実測値($Rv=0.33\pm0.09$)に対して解析結果は $Rv=0.35\pm0.09$ とほぼ一致し, a2 地点でも実測値($Rv=0.66\pm0.12$)に対して $Rv=0.71\pm0.05$ と, 少し大きめながらも良好な値が得られている. 到達距離において実際の分布範囲の下限に近いといった問題はある. この点は, 形状や規模によって飛び方が異なるため一概には評価できないものの, その広がりも含めて, 結果はほぼ実際通りと判断できる.

なお, 図 6.3.3 には, SF 曲線を使用せず, a1 地点での速度比($Rv=0.33$)と a2 地点での速度比($Rv=0.66$)を, それぞれ斜面全体の代表値として解析したときの速度軌跡を点線で示した. $Rv=0.66$ のときは a1 地点から大きく跳びだし, $Rv=0.33$ では a2 地点以後すぐに停止する. これは, 3 章で説明した解析困難な状況と全く同じであり, 速度比の法線方向入射速度依存性を考慮した場合との違いは一目瞭然である[2].

以上, 本事例解析の結果から, 3 章では解析困難とした, 落下経路の途中に大きな地形変化点がある斜面においても, 速度比の法線方向入射速度の依存性を考慮し, 適切な SF 曲線を設定することで解析が可能となることが明らかである.

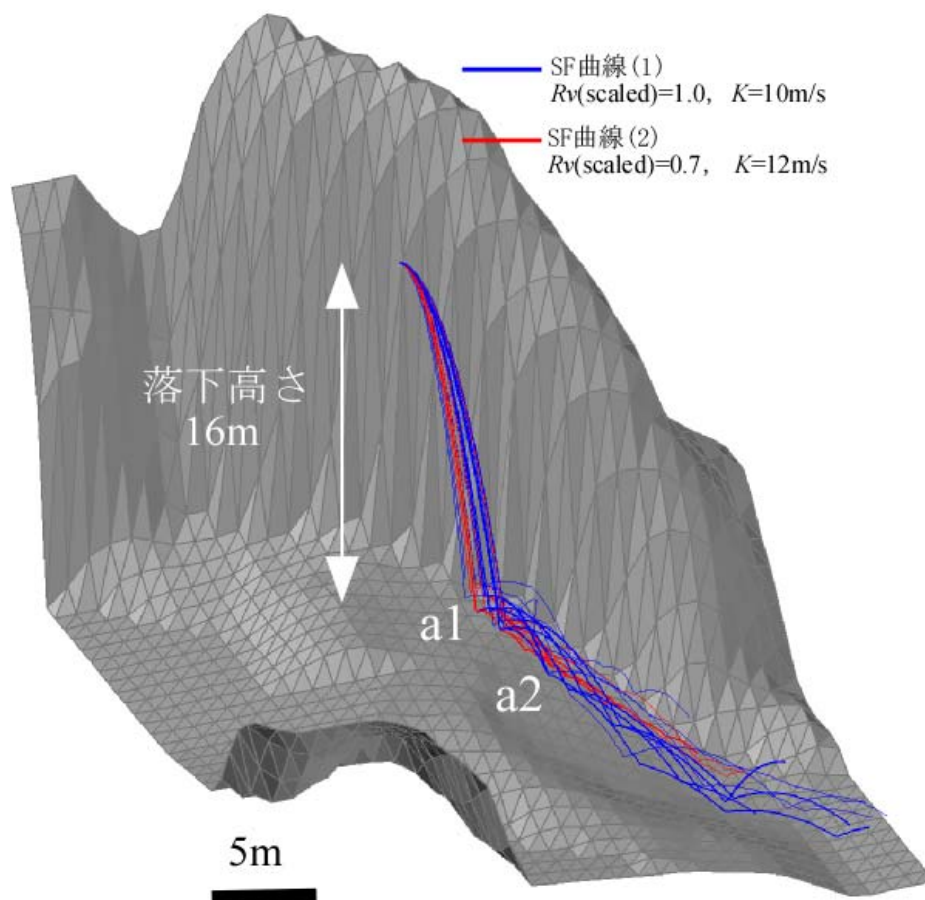


図 6. 3. 2 現場(a)の DDAball 解析結果軌跡図

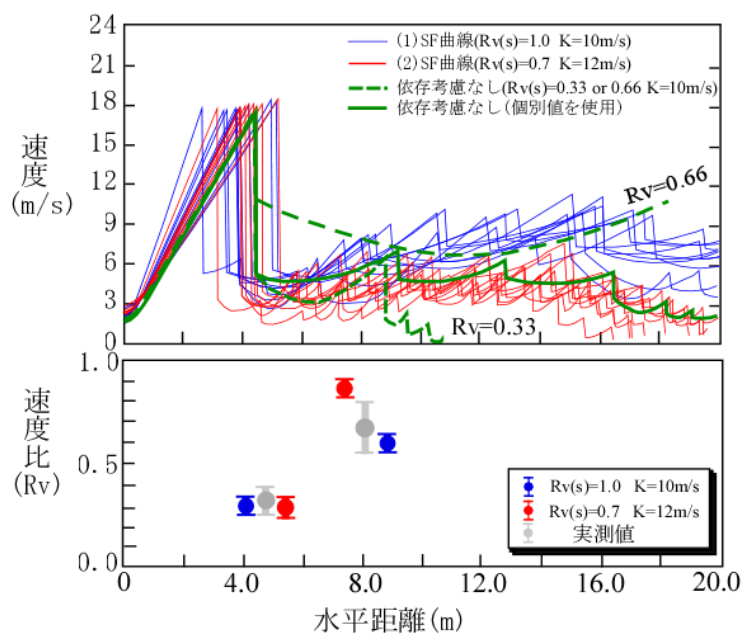


図 6. 3. 3 DDAball による解析結果(速度軌跡図)

6.3.2 現場(c)への適用事例

(1)現場(c)の概要

本現場は、4章で述べた、水平距離 90m、比高差およそ 60m の採石場の斜面であり、前節で述べたような大きな地形変換点はない。ただし、本現場でも、速度比データは、斜面中間部の代表的な反発点(c1,c2 地点)のみである。

落下岩塊は、ブルドーザーで押し出された後、平均傾斜 33° の崖錘相当の斜面上を、低い跳躍を繰り返しながら落下する。速度比の計測地点は、本斜面における落下岩塊の最大速度区間である。c1 地点は、小崖の遷急部から飛びだした岩塊が $18\sim 25\text{m/s}$ で飛び込む地点に位置し、衝突時の噴煙の大きさからみても地盤の変形によるエネルギー損失の最も大きい。実際、入射角度の平均が 69 度と大きいにもかかわらず、速度比の平均は $Rv=0.55$ と、ほぼ同じ入射角度で衝突する c2 地点の $Rv=0.68$ に比べて小さいことが特徴である。

(2)速度比と SF 曲線

解析に用いた SF 曲線は、図 6.3.4 (a)に示す、SF 曲線(1) $Rv(\text{scaled})$ を 1.0、 $K=13\text{m/s}$ と、SF 曲線(2) $Rv(\text{scaled})=1.0$ 、 $K=8\text{m/s}$ の 2 つである。SF 曲線(1)は、速度比分布の最大側を通る曲線であり、SF 曲線(2)は、c1,c2 のほぼ平均を通る曲線である。なお、計測結果中には $Rv=1.0$ 以上の値もみられるが、これを考慮すると SF 曲線の補正速度は $K=18\text{m/s}$ 以上となり、結果に与える影響が大きい。このため、SF 曲線探索時には $Rv=0.95$ 以上の値を無視した。図 6.3.4 (b)に示す予測結果では、SF 曲線(1)でも予測が実測を大きく上回り、SF 曲線(2)で、ほぼ平均的な予測結果となる。

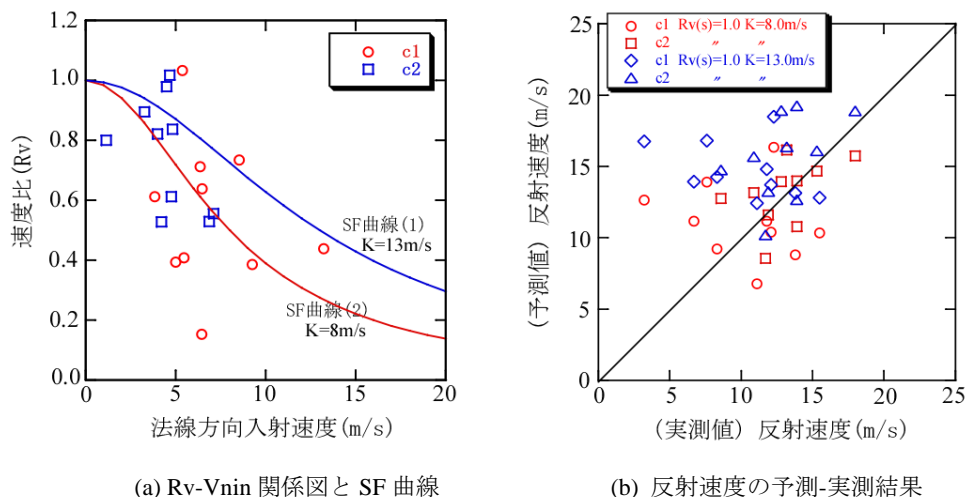


図 6.3.4 現場(a) 解析に用いた SF 曲線と反射速度り予測実測対比図

(2)DDAball による再現解析

解析に用いた地形モデルは、2.5m 間隔の等高線平面図上に 3m×3m の格子枠を設定し、格子の頂点に標高を与えた後、三角形要素として作成した。落下岩塊は、計測岩塊のほぼ平均である半径 0.6m の球体でモデル化した。なお、岩塊はブルドーザーによって押し出されているため、落下開始点には 5m/s の初速を設定した。ここでも、現場(a)での解析同様に、水平方向(x,y 方向)の初速に±0.25m/s の変化を与えた。

解析に用いた入力定数を表 6.3.2 に示す。

表 6.3.2 現場(c)の入力パラメータ

入力項目	入力値
落石質量	2352kg
密度	$2.60 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
摩擦角	30°
$\Delta t \text{ (sec)}$	0.0001
ペナルティバネ (Kn)	$2.3 \times 10^7 \text{kN/m}$

なお、 $\Delta t/T=0.05$ である。

解析結果による速度の変化を、観察した 10 個の落石の速度軌跡を背景として、図 6.3.5 に示す。解析により得られた速度比は、c1 地点では実測値の $R_v=0.55 \pm 0.24$ に対して $K=13\text{m/s}$ のときは $R_v=0.75 \pm 0.13$ 、また $K=8\text{m/s}$ のとき $R_v=0.59 \pm 0.16$ となり、SF 曲線(2)の方が良好である。また、c2 地点では実測値である $R_v=0.76 \pm 0.19$ に対して、 $K=13\text{m/s}$ のとき $R_v=0.87 \pm 0.07$ 、また $K=8\text{m/s}$ のとき $R_v=0.75 \pm 0.12$ となり、ここでも SF 曲線(2)の方が良好である。この結果は、図 6.3.6 の速度軌跡図にも表れており、SF 曲線(2)では、速度の軌跡は実測範囲のほぼ上限付近を通るが、SF 曲線(1)では全体に予測が実測を上回る。このため、観察された到達地点に達しても速度は低下せず、図 6.3.5 の軌跡図にみるように末端の堤に衝突してなお飛び跳ねる。本結果からは、明らかに SF 曲線(2)によるシミュレーション結果が良好といえる。

なお、図 6.3.6 には、現場(a)同様に、SF 曲線を用いず、斜面全体の速度比として $R_v=0.84$ (我が国の土砂斜面での平均値)を入力したときの速度軌跡も示した。その結果と、SF 曲線による速度軌跡の違いは明らかである。

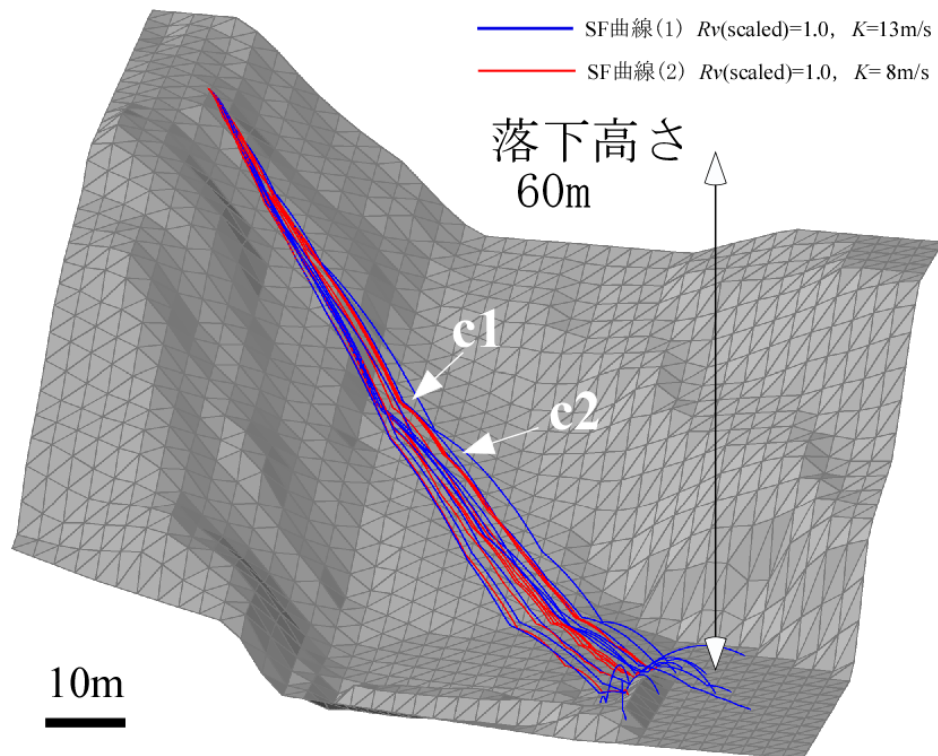


図 6.3.5 現場(c)の DDAball 解析結果軌跡図

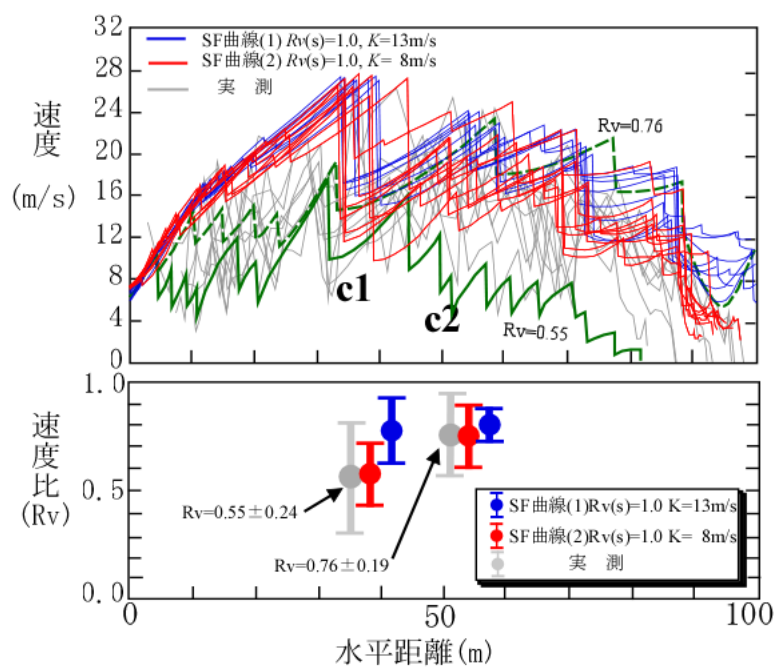


図 6.3.6 DDAball による解析結果(速度軌跡図)

以上の結果から、斜面全体、あるいは斜面の代表的な衝突点での速度比と法線方向入射速度の関係が得られれば、ほぼ適切な SF 曲線を探索することができ、これを考慮した DDAball による挙動予測が可能となることを示した[2][3].

ただし、本結果からいくつかの留意点もみつかるとは。

- 1) 室内実験結果から SF 曲線を推定する再には分布最大側で想定した。しかし、実現場から推定する際には、分布の平均の方が結果は良好である。
- 2) 室内実験からは、 $R_v(\text{scaled})$ は 1.0 とするのが妥当と考えられたが、本結果からは 1.0 以下となるケースもあり得ることがわかる。

1)の問題はばらつきの処理の問題であり、一方 2)の問題は実現場の斜面では衝突による地盤の塑性変形が与える影響が大きいことが原因と考えられる。いずれの問題も入射角度の大きいところでのばらつきであり、これを SF 曲線を見た場合、 $R_v(s)$ の変動が大きく、逆に K による影響はさほど大きくないという解釈可能である。しかし、このようなばらつきの原因には、SF 曲線だけでなく、落下岩塊を球で単純化したり、実際には凹凸の大きい岩砕状の斜面を平滑な斜面モデルで表したことなどもあると考えられ、これらの点については今後、さらに検討していく必要がある。

6.4 公表されている実験現場への適用事例

これまでは、室内実験および現場実験結果の再現解析を通じて、速度比の法線方向入射速度依存性、すなわち SF 曲線法を導入した DDAball が、実際の現場斜面に十分に適用可能であることを示した。本節では、既往の公表データを用いて本手法適用の一般性を探る。

なお、本手法の適用にあたっては、少なくとも 1 つの斜面の 2 箇所以上で、入射時の速度と角度、そして速度比が計測されている必要がある。しかしながら、20 カ所に近い過去の実験現場をみても、そのような現場はきわめて少ない。本節では、この条件を不十分ながらもほぼ満たす、菌原、高松の 2 箇所の既往現場に適用する。

6.4.1 菌原現場への適用事例

(1) 現場の概要

本事例は、旧道路公団が群馬県利根川村大字菌原、利根川水系の上流に位置する「菌原ダム」において行った落石実験であり、詳細については 4.4.6(c) で述べた。斜面は、軟岩斜面(A)と、崖錘斜面(B)の 2 つがあり、それぞれ 1 例ずつが落石対策便覧に示されている。それぞれの斜面の形状および、各速度比の計測結果を図 6.4.1 に再掲する。

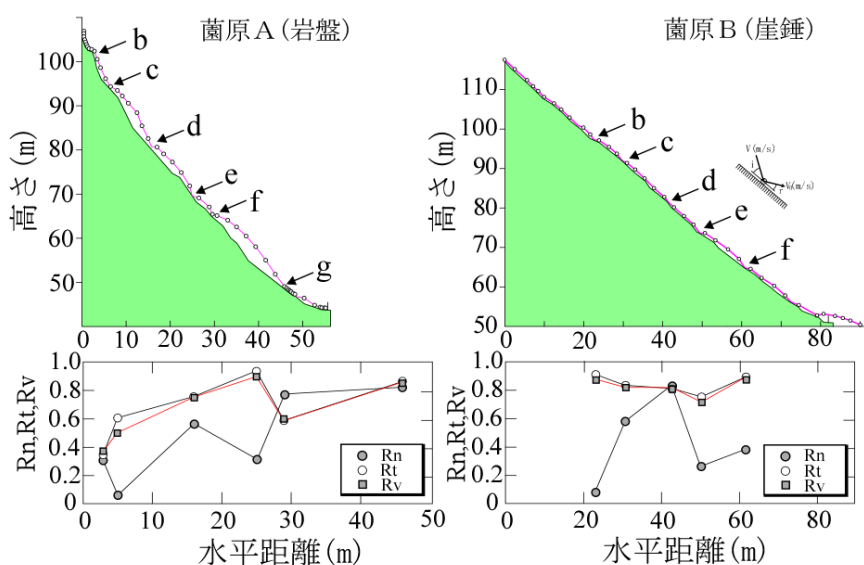
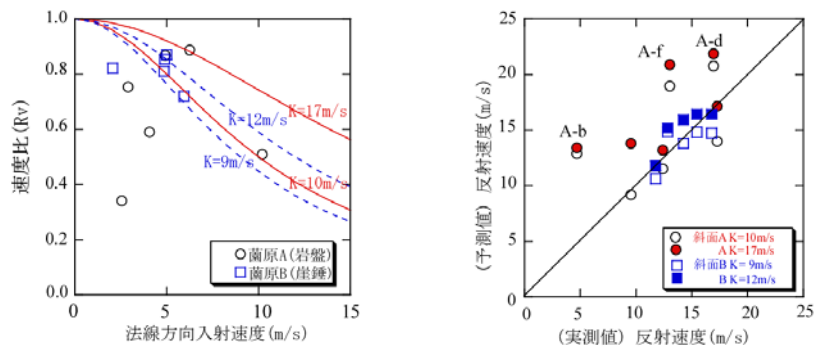


図 6.4.1 菌原実験から得られた R_n, R_t, R_v [1][2]

いずれの事例も、斜面の傾斜は異なるものの落下経路途中の地形には大きな凹凸を含まず、この点では前節の現場(c)に似ている。

第 4 章の 4.4.6(c) では、この結果をもとに、前節同様、分布の最大側とほぼ平均を通る 2 種類の SF 曲線について考察した。以後、各現場別に解析結果について述べる。



(a) R_v - V_{nin} 関係図と SF 曲線

(b) 反射速度の予測実則対比結果

図 6.4.2 菌原事例における SF 曲線による反射速度の解析結果.

(2) 菌原 A (岩盤斜面) の概要と結果

斜面 A のケースでは、以下の 2 つの SF 曲線を想定した.

- ① $R_v(\text{scaled})=1.0$ $K=10\text{m/s}$ (分布最大側を通る曲線)
- ② $R_v(\text{scaled})=1.0$ $K=17\text{m/s}$ (反射速度の予測と実測の相関がもっとも高い)

①は、あらかじめ反射速度の予測値と実測値の比較結果から、その相関がもっとも高くなるように求めた平均的曲線である. また、②は、図 6.4.2 (b) に示す反射速度の予測と実測の相関が最も高くなるよう試行錯誤で想定した SF 曲線である. このため、②の曲線の反射速度の予測値は、すべて実測値をオーバーしている. 解析は、この 2 つの曲線を用いて行った. 解析時の入力物性値を表 6.4.1 に示す、なお $\Delta t/T=0.049$ である.

表 6.4.1 菌原 A 入力値

菌原A 入力項目	入力値
落石質量	807kg($r=40\text{cm}$)
密度	$2.60 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
摩擦角	30°
$\Delta t(\text{sec})$	0.001
ペナルティバネ(Kn)	75000

図 6.4.3 に、DDAball による解析軌跡と速度の結果と実測結果を示した. なお、実測結果は緑色の点線で表している.

軌跡でもっとも特徴的なのは、落下最初の地点である. 実測では、最初の落下は地形に

沿うが，解析結果では地形に沿って飛び出す．6.1.3 では，本手法が小さい速度と小さい入射角度の領域では速度比を過大評価する傾向があることを指摘したが，本事例はこのケースに該当する．このような，初期の速度と軌跡の影響は，斜面中断から末端にかけの挙動に大きく影響することがあるため注意が必要である．

一方，落下後の速度の変化は K の値によって明瞭に異なる． K の値が小さいと反発後の飛距離が短く， K の値が大きいと飛距離も延び，その後の反発も大きい．本結果から，結果的には①曲線，すなわち $K=10\text{m/s}$ の SF 曲線の結果が実測に近いと判断できる．

なお，図 6.4.3 には， $R_v=0.95$ としたまま SF 曲線を用いない方法で解析した場合の軌跡と速度を示した．軌跡から大きな違いはわかりにくい，速度にはその違いが明瞭に表れている．

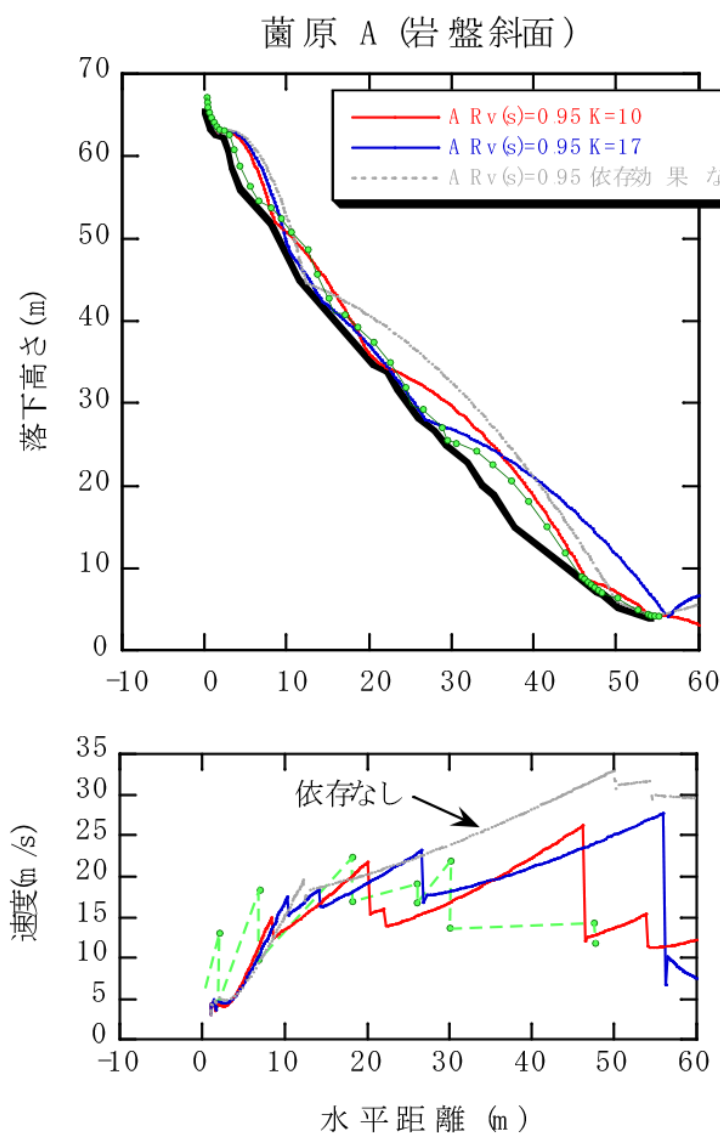


図 6.4.3 菌原 A 解析結果(実測値=緑)

(3) 菌原 B(崖錐斜面)の概要と結果

斜面 B のケースにおいても、以下の 2 つの SF 曲線を想定した。

① $Rv(scaled)=1.0$ $K=9m/s$

② $Rv(scaled)=1.0$ $K=12m/s$

本解析でも、斜面 A 同様次の 2 つの曲線で行った。①はあらかじめ反射速度の予測値と実測値の比較結果から、その相関がもっとも高くなるように求めた曲線である。また、②は、速度比-法線方向入射速度関係図の分布において最も外側を通るように決定した曲線である。解析は、この 2 つの曲線を用いて行った。解析時の入力物性値を表 6.4.2 に示す、なお $\Delta t/T=0.049$ である。

表 6.4.2 菌原 B 入力値

菌原B 入力項目	入力値
落石質量	324kg($r=31cm$)
密度	$2.60 \times 10^3 kg/m^3$
摩擦角	30°
$\Delta t(sec)$	0.001
ペナルティバネ(Kn)	30000

図 6.4.4 に、DDAball による解析軌跡と速度の結果と実測結果を示した。ここでも、実測結果は緑色の点線で表した。本解析でも、 $Rv(s)=0.95$ とした。

本結果からは、 $K=9$ と $K=12$ の時の軌跡と速度比の違いをみることで、 K の影響を具体的に知ることができる。すなわち、 $K=9$ のとき、1 反発ごとの飛距離は $K=12$ に比べて小さく、速度比も小さい。結果は、いうまでもなく①曲線の方が実際に近い。

なお、図 6.4.4 には、 $Rv=0.95$ としたまま SF 曲線を用いない方法で解析した場合の軌跡と速度を示した。ここでも、速度比の特性を考慮しない場合とした場合との差が歴然としている。

以上の結果から、斜面を構成する材質がほぼ一定であれば、速度比の法線方向入射速度による依存性を考慮するだけで、実際の結果とほぼ同等の再現結果が得られることがわかる。

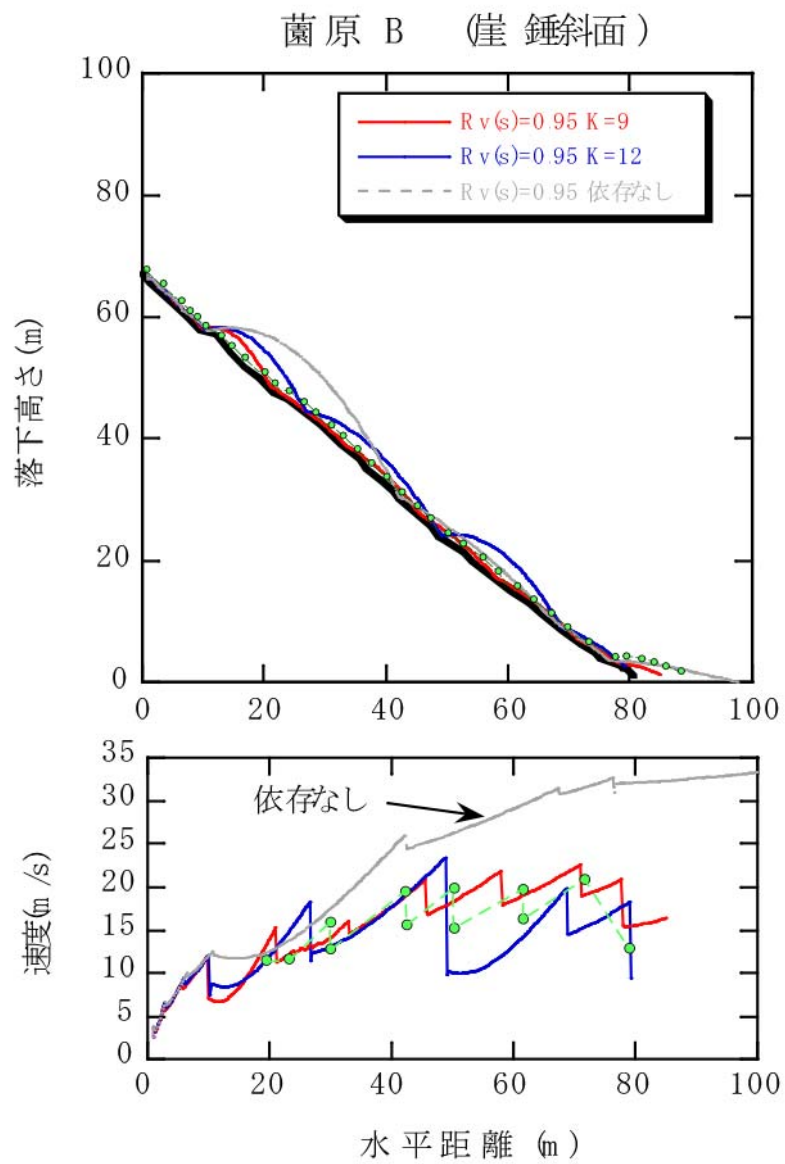


図 6.4.4 菌原 B 解析結果 (実測値=緑)

6.4.2 高松実験への適用

(1)現場の概要

本事例は、土木研究所(旧建設省)が 1980 年に高松市近郊の香川県牟礼町で行った実験結果である。記録では、0.09～1.15m の大きさの塊状、板状の花崗岩を投石している。実験は、4 つの地形タイプの異なる斜面で行い、落下、ころがりなどの実験を行っている。ここでは、解析事例報告が最も多い、塊状岩塊の実験結果に対する再現解析を試みる。

実験はコンクリートの斜面上に高さ 9m の地点から平均質量 170kg の塊状岩塊を落下させて行っている。投石地点 A の傾斜は 60° であり、投石地点 B の傾斜は 30° である。

図 6.4.5 に、落石対策便覧資料で示されている実験結果の軌跡図を示す。また、表 6.4.3 に、最初の各投石地点での計測結果を示す。なお、4 章で述べたように、入射角度が小さい領域では、斜面の物性が同じであっても次第に反射角度>入射角度の関係が強くなっていく。このため、反射角度については図 6.4.5 から読みとることとし、これをもとに速度比(Rv)を想定した。

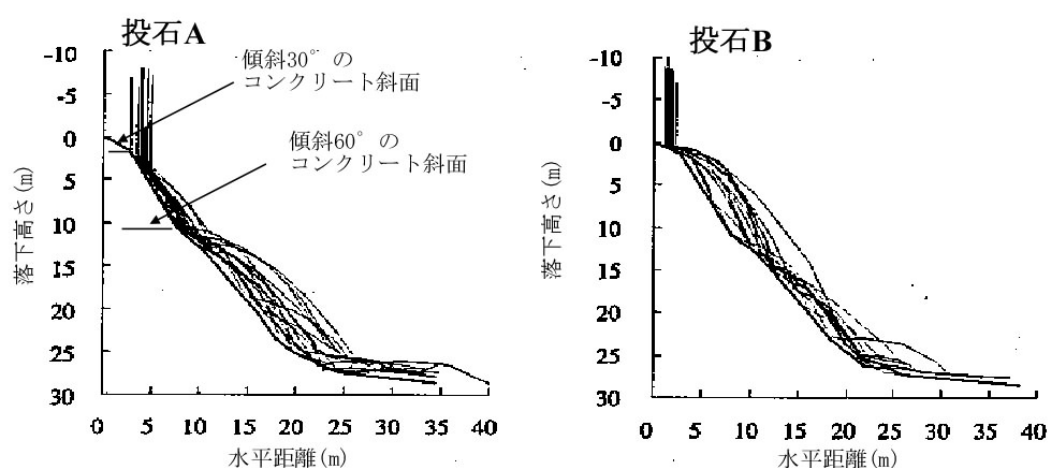


図 6.4.5 高松実験 投石 AB 地点の実測軌跡

表 6.4.3 実測値と想定速度比

	投石A地点	投石B地点
落下地点の傾斜	60°	30°
落下岩塊質量(kg)	170	170
法線方向入射速度	6.6	11.5
実測(Rn)	0.48	0.28
読み取り反射角度	70°	55°
想定速度比(Rv)	0.70	0.42

(2)SF 曲線の作成と入力値

SF 曲線を作成するためには、少なくとも 2 地点での法線方向入射速度と速度比が必要となる。法線方向速度比(R_n)については、表 6.4.3 より法線方向入射速度との関係をもとに R_n の SF 曲線を求めた。一方、速度比(R_v)の SF 曲線は、図 6.4.5 より反射角度を読み取り、これを基に反射速度を推定して作成した。結果は図 6.4.6 に示すとおりである。4 章で、現場実験では、法線方向入射速度の低い方、すなわち入射角度の大きい方ではばらつきが大きく、室内実験に比べて高い値をとることが多いことを述べたが、本結果も同様の傾向を示している。なお、 R_v の SF 曲線の $R_v(s)$ がほぼ 1.0 と想定されるのは、室内実験結果やこれまでの現場実験の結果と同様である。

ちなみに、図 6.4.7 には、右城らが示した法線方向速度比(R_n)の回帰式を示した。本図から、回帰式は、 R_n に関する SF 曲線($R_n=0.8$, $K=8$)とほぼ同じカーブを示している。

本解析では、速度比については、 $R_v(s)=0.95\pm0.05$ として ±0.05 の変動を与えた。また補正速度についてもそれぞれ示した値に ±1.0 の変動を与えて解析を行った。試行回数は 30 回である。入力値を表 6.4.4 に示す。

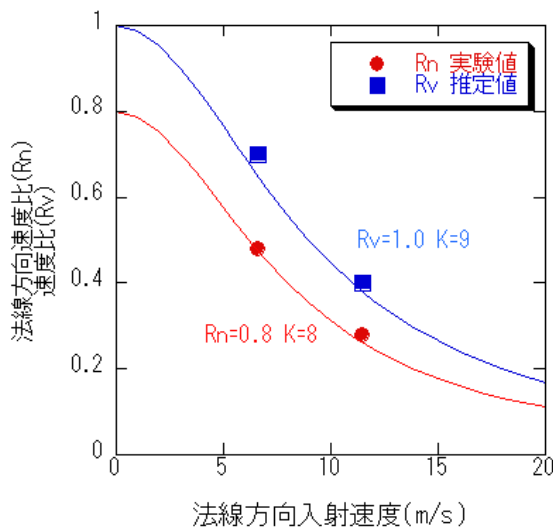


図 6.4.6 高松実験の R_n と R_v の SF 曲線

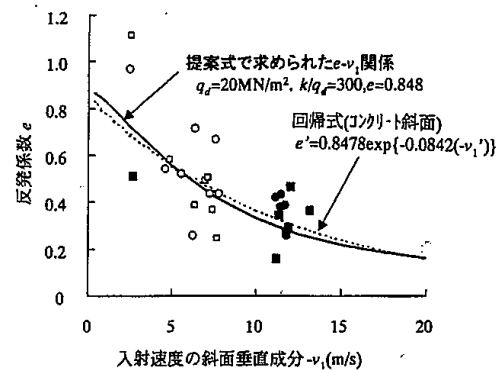


図 6.4.7 高松実験の R_n

表 6.4.4 高松実験再現解析の入力値

入力項目	入力値
単位体積重量	26kN/m ³
摩擦角	10°
球体の半径	0.25m
タイムステップ(Δt)	0.0005sec
ペナルティーバネ(kn)	60000kN/m

＜投石 A の解析結果＞

投石 A では、図 6.4.8 に示す箇所で落とした。落下高さは 9m である。Rv(s)を用いた曲線を①曲線、Rn(s)を用いた曲線を②曲線と呼ぶ。

本 SF 曲線による軌跡と速度の解析結果を、図 6.4.8 の下に示す。投射後、最初の反発による到達距離が変化しているのは、SF 曲線にばらつきを持たせたためである。本結果で興味深いのは、2 度目の反発地点での反射後の軌跡であり、反射場所によって最大包絡線に近づくか離れるかが別れる。実験では、落下位置にも幅があるため、衝突地点が細かく変化し、よりランダムな軌跡を描く(図 6.4.5)。この理由が入射角度の変化、形状による反射軌跡の変化などに起因することは、これまで説明したとおりである。図中には、実験軌跡の包絡線を示した。再現解析結果を、最初の衝突地点の結果が斜面中段での反発結果を生み、その結果として軌跡が実際の包絡線に近づくと考えると、再現には②曲線の使用が好ましいと考えられる。なお、図の下には、①②の曲線を用いた場合の速度軌跡を示した。最初の落下地点の反発速度に、2 つの曲線の違いが出ているが、以後の速度の推移には大きな違いはみられない。

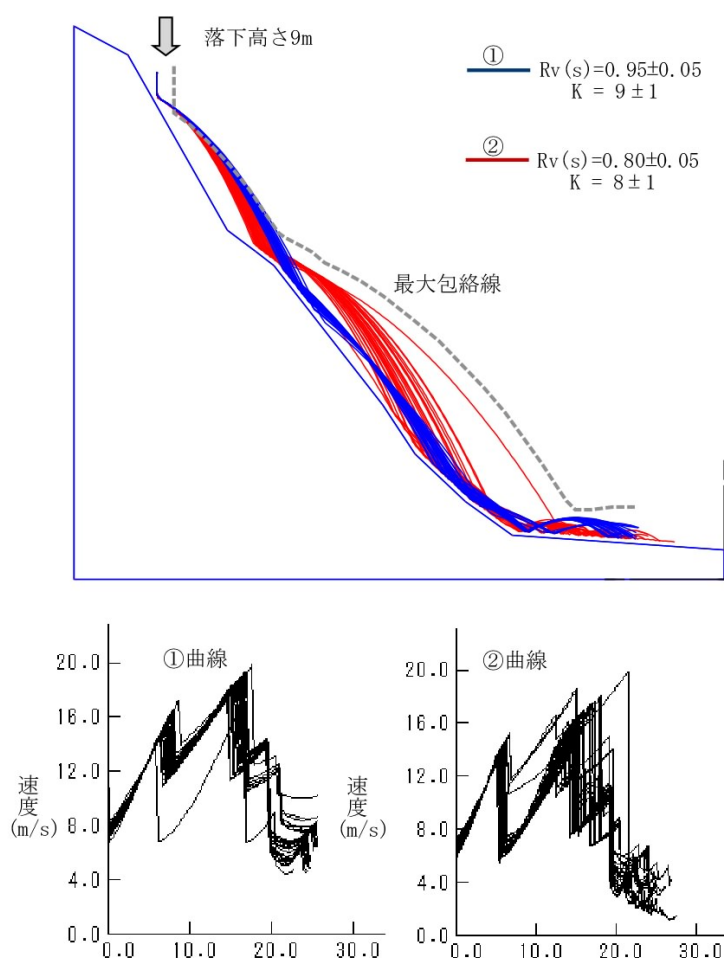


図 6.4.8 高松 投石 A の SF 曲線法による解析結果

＜投石 B の解析結果＞

投石 B でも、投石 A 同様 2 種類の曲線を比較した。実際の軌跡(図 6.4.5)と最も異なるのは最初の落下点での反射角度である。ここでは速度比($Rv(s)$)、補正速度(K)ともに大きい①の曲線の反射角度が実際よりかなり大きく、②の SF 曲線を用いてもまだ高い。室内実験の再現軌跡のところでも述べたが、これが入射角度が小さい領域で速度比を過大評価する $Rv(s)$ —SF 曲線法の難点である。ただし、実験結果の最初の反射地点での軌跡が衝突後ほぼ水平に飛びだしているのは、入射角度の差が大きいことから、落下岩塊とコンクリートとの材質の差に起因した非弾性反発の影響によるものとみられる。

同図の下には、①②曲線による速度軌跡を示したが、投石 A と同様、最初の衝突地点の違いを除けば、全体に大きな違いは見られない。

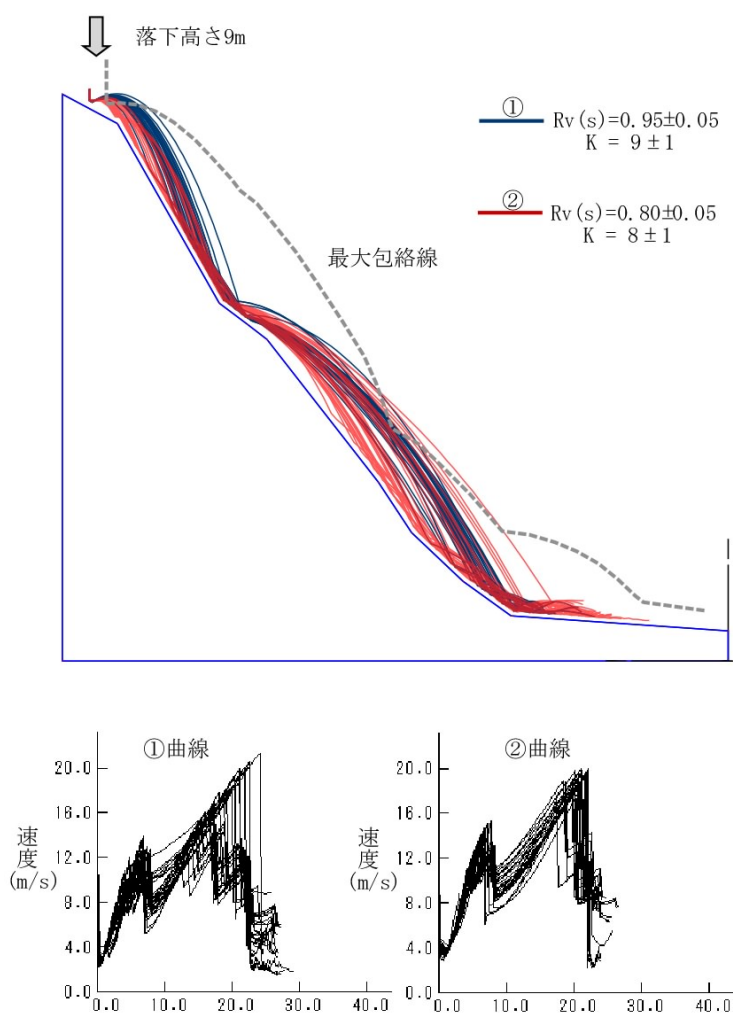


図 6.4.9 高松 投石 B の SF 曲線法による解析結果

以上、高松実験の既往報告をもとに、傾斜 30° と 60° のコンクリート斜面における DDAball による再現解析を行い、実験結果と軌跡を中心に対比した。再現解析に用いたのは、①法線方向速度比と反射角度の読みとりから導いた速度比($Rv(s)$)の SF 曲線と、②法線方向速度比の SF 曲線そのものの、2 種類である。再現解析の結果からは、後者の方が良好であるという結果になった。ただし、投石 A、投石 B の再現結果ともに、その再現軌跡は実験結果による軌跡図(図 6.4.5)に比べて単調である。これには、用いた $Rv(s)$ と K のばらつき範囲が狭いこと、実際の岩塊形状によるばらつきが考慮されていないこと、図 6.4.10 のように地形モデルを単純化したことによる斜面の細かな凹凸が未考慮であることなど、いくつかの理由が考えられる。実際、右城、榎谷らは、用いた法線方向速度比の読みとり時に、角度判定のばらつきが含まれるとして、入射角度にばらつきを持たせた解析を行い良好な結果を得られたとして報告している。この点については、DDAball の今後の課題といえる。

ただし、法線方向入射速度の依存性を考慮したことによる効果は大きく、本結果から、速度比(Rv)を用いた SF 曲線法は、斜面上の落石挙動を想定するうえで十分実用的であることがわかる。

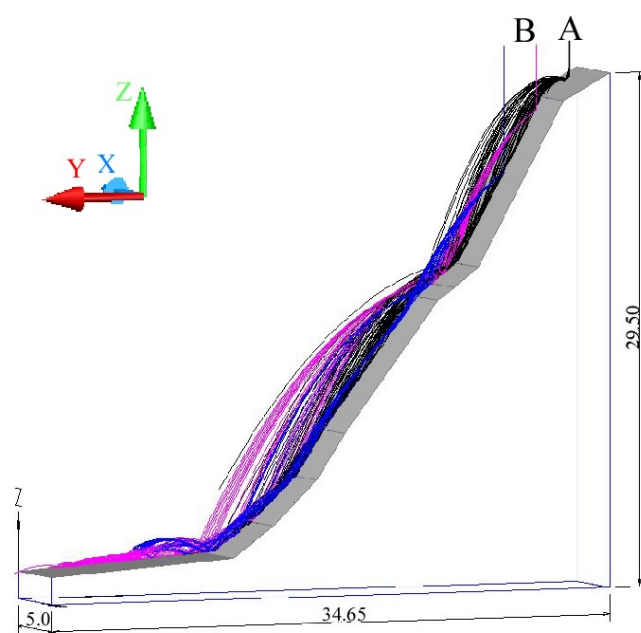


図 6.4.10 投石 AB の合成三次元図

図 6.4.10 は、図 6.4.8 と図 6.4.9 を合成して三次元で表した図である。DDAball は、基本的には三次元であるが、このような二次元断面での解析も可能である。

6.5 ばらつきの導入

落石シミュレーションには，多くの不確実性が存在する．岩塊の形状，地形の起伏，地盤の硬軟，そして反発時の速度比などである．しかし，現段階ではこれらの割合や，状況に応じた占有比率など，ほとんどがわかっていない(図 6.5.1)．

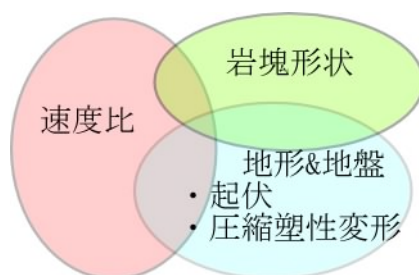


図 6.5.1 ばらつきの種類とイメージ

表 6.5.1 解析で考慮されるばらつきの種類と効果

考慮されるばらつき	ばらつきの期待効果
法線方向速度比 (R_n) 接線方向速度比 (R_t)	反発時の速度と軌跡
すべり摩擦係数	反発時の軌跡，停止位置
斜面変化角，ラフネス	反発時の軌跡(速度)
限界速度	回転→飛行(運動の変化)
初期速度	軌跡全体
形状と初期姿勢	軌跡と速度 (不連続体解析法)

一方，表 6.5.1 は，質点解析法と不連続体解析法で考慮される確率変数の種類と効果を一覧したものである．この他にも地盤の変形に影響するパラメータもあるが，そのほとんどが反発，速度にかかわるものである．これらを，本研究の目的に沿って整理すると，シミュレーションへのばらつきの導入には以下のような課題がある．

- ① R_n には入射速度に依存する性質があるが，これまで公表され蓄積されたデータには，この性質がどこまで考慮されているのか不明であり，見直しが必要．
- ② 速度エネルギー比として公表されているデータは，速度比(R_v)が入射角度に依存する性質が明らかとなったため，これを含めた見直しが必要．
- ③ 斜面変化角，ラフネスは，現段階では効果が高いと言われるものの，その決定方法や効果は，地形モデルの作成方法とも絡むため，今後の検討が必要．
- ④ 落石対策便覧では，不連続体解析法の形状効果をもってばらつきに置き換えられる可能性を指摘しているが，この方法はその後検討されていない．

以上のうち、①と②については、今後、既往データの見直しやさらなる現場実験、既往災害の事後解析などを含めた検討が必要となる。ただし、③と④については、現段階での DDAball を用いても、検討を継続することが可能である。本論文では、その予備的検討結果を示し、今後の方向性を示すことにする。

6.5.1 DDAball を用いた、斜面変化角(ラフネス)によるばらつきの考慮

高松実験に関する再現解析報告書をみると、いずれもデータのばらつきの大きいことが強調されている。4 章でも述べたが、法線方向速度比(Rn)の計測には、入射角度の測定が必要であり、この角度の計測に大きな不確実さを伴うことが原因とされる。前節では、ばらつきを Rv(s)と K のみに考慮して軌跡と速度の傾向をみたが、本節では DDAball におけるばらつきの考え方について述べる。

DDAball は、落石に球体を用いている。質点解析と異なり球体の大きさを考慮できる点が大きな利点であるが、DEM のようにバネの特徴を活かしている訳ではないので、この意味では基本的に質点解析と同様である。ところで、モデルが単純な質点解析では、落石形状や衝突斜面の細かい起伏による入射角度の影響を、衝突面の入射角度にばらつきを与える方法で考慮している。

図 6.5.2 は、右城らが、見掛けの入射角が法線方向速度比(Rn)に与える影響を図示したものである。真の斜面傾斜角は、衝突時の変形や地盤の凹凸を考慮した θ' である。これに対し、測量で得られる斜面の傾斜は見掛けの傾斜角であるため、その差が Rn(図中では e) のばらつきに表れ、過大評価されているとしている[7]。小村らも同様に、法線方向速度比のばらつきの原因が、すべて傾斜角度の読みとり誤差($\Delta \theta$)にあると仮定して、誤差角 $\Delta \theta$ を、式 6.5.1 で表している[6][7]。

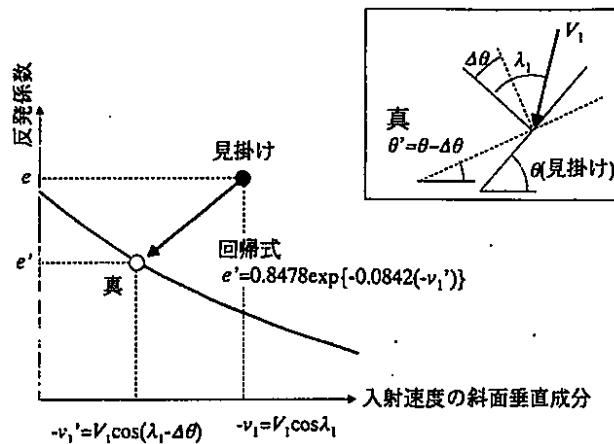


図 6.5.2 Rn 計測結果の斜面補正角($\Delta \theta$)

$$\Delta \theta = \tan^{-1} \frac{V_2 \cos \lambda_2 - e' V_1 \sin \lambda_1}{V_2 \sin \lambda_2 + e' V_1 \cos \lambda_1} \quad 6.5.1$$

右城らは、投石 B における平均値と標準偏差を以下のように報告している[7].

平均値 $m(^{\circ})=0.12 \theta$, 標準偏差 $\sigma(^{\circ})=0.374 \theta$.

ここで, $\theta=30^{\circ}$ とすると, 標準偏差は $\pm 11.22^{\circ}$ となる. 文献[1]では, 古賀らも 9.29° と近似した値を用いている. ただし, 同様に文献[1]には, 右城らは $\pm 20^{\circ}$, 榎谷らは $\pm 25^{\circ}$ とも表記している. 投石地点, あるいは斜面の種類によって変化させている可能性もある. いずれにせよ, 文献[1]では, この結果を用いて衝突時の入射角度に標準偏差分のばらつきを考慮して解析を行い, 良好な結果を得たとしている.

一方, 近年では三次元でも, 類似の方法で考慮可能となっている. 榎谷らも同様の方法による三次元質点解析法を提案している[1]. また, 細谷らは, DEM による解析において, 平面要素の頂点座標に, 起伏を模したばらつきを考慮して解析を行っている[8]. 図 6.5.3 は, 細谷らが示した, 実斜面の起伏から平面要素のばらつきに変換する方法である. 斜面測量結果から得られた起伏の計測結果から, 平均値と標準偏差を求めるための考え方を示している.

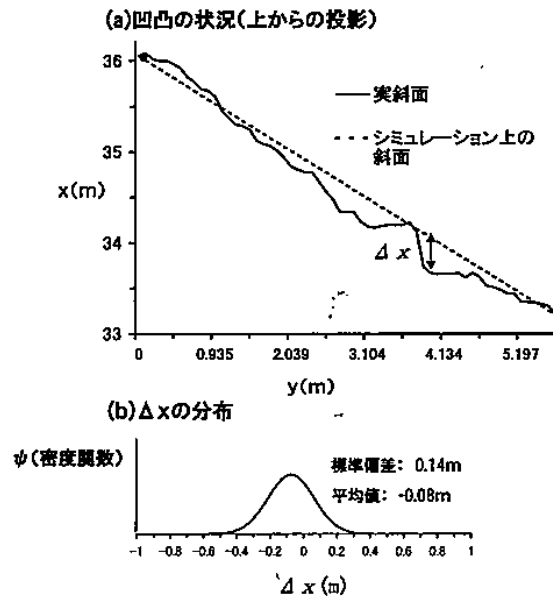


図 6.5.3 シミュレーション上の斜面と実斜面の凹凸分布

DDAball も, モデル形状は細谷らの方法と同じであるため, ここでは同様にして平面要素の頂点座標の高さ方向に正規乱数を与えて計算する方法を試みた.

解析を行ったのは, 前節の高松実験の投石 B のケースである. 入射角のばらつきは, 投石地点とばらつきとの関係が明瞭な値として, $\sigma=11.22^{\circ}$ を用いた.

DDAball における入力値と平面要素のばらつきの関係は, 図 6.5.4 に示すようであり, 平面要素の変の中心からの高さの変化を要素変化角の半値として扱う. したがって, 入力値は, 図に示したように, $2l \sin \theta$ となる. l は, 辺の長さであり, 本モデルでは $1.5m$ とし

ている。

解析に用いた入力値を表 6.5.2 に示す。なお、試行回数は 60 回である。

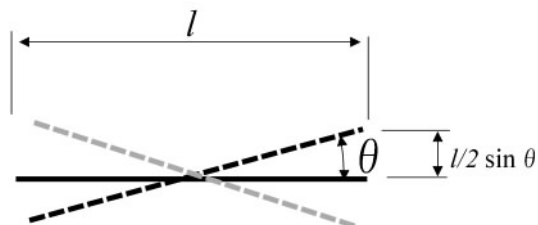


図 6.5.4 DDAball における斜面要素変化角と高さ

表 6.5.2 高松実験再現モンテカルロ解析入力値

入力項目	入力値
単位体積重量	26kN/m ³
摩擦角	10°
球体の半径	0.25m
タイムステップ(Δt)	0.0005sec
ペナルティーバネ(kn)	60000kN/m
速度比(Rv(s))	0.8±0.1
補正速度(K)	8±1
要素変化高さ(半値)	0.14m

解析結果の断面図を、図 6.5.5 に示す。本結果は、図 6.4.9 と対比するとその違いが明瞭である。すなわち、斜面要素の変化高さを考慮しない場合に単調だった軌跡が、衝突点の要素で反射方向が変化するため複雑になり、軌跡の高さも大きく増している。特に、斜面中段で跳ねる軌跡に、要素高の変化を考慮するばらつきの効果がみてとれる。ただし、軌跡が集中する範囲は、斜面要素の高さの変化を考慮しない場合とほぼ同じ範囲である。

図 6.5.6 は、結果を三次元で表した図である。DDAball において、斜面要素の高さを変化させる場合、本図のように細かい要素の組み合わせに必要がある。モデルは、断面をそのまま押しだして作成している。このようなモデルにしたことで、上下に跳ねるだけでなく、落下方向に広がる様子が表現されていることがわかる。要素の変化幅を大きくとるほど、上下に大きく跳ねるようになり、下方斜面への広がり角も増す。

このような傾向は、3 章、3.5.5 の二次元解析の落石モデル形状のところで述べた、内角が大きくなるほどばらつく傾向に似ている。本結果は、岩塊の形状と斜面の起伏の影響を同時に考慮しているが、それぞれの影響割合や、形状、起伏の現地での調査方法などは、今後の課題である。

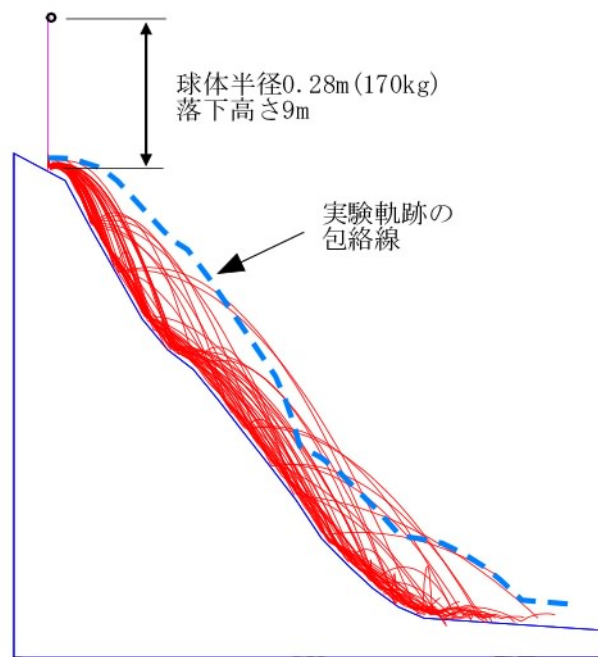


図 6.5.5 投石 B の斜面要素変化角を考慮した解析結果

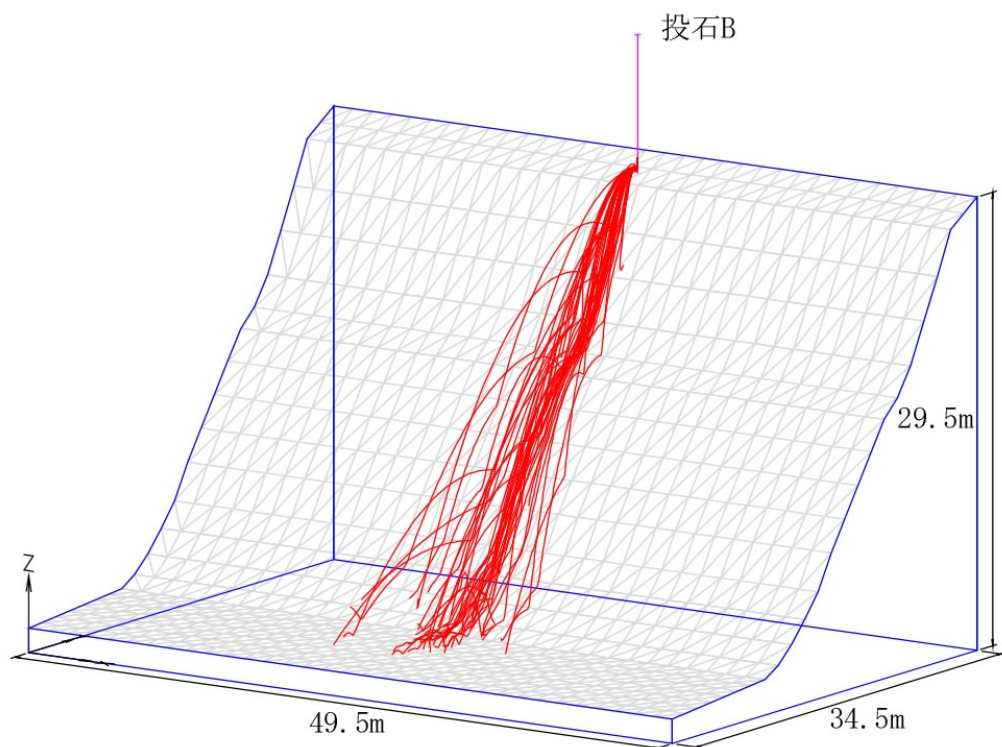


図 6.5.6 投石 B の斜面要素変化角を考慮した解析結果(三次元表示)

6.5.2 岩塊形状が反発時の軌跡のばらつきに与える影響

落石対策便覧では、二次元 DDA を用い、多角形の中心を固定したうえで、多角形を 10° ずつ $0\sim 90^\circ$ の間で変化させる方法で、落石軌跡のばらつきを表現する方法を提案している。この方法は、3 章で述べたように、モデルの形状と時間刻みと衝突時の回転の影響が複雑に絡むため、本来は検討すべき項目が多い。しかし、落石対策便覧での検討時に考慮されていなかった速度比の性質に関する問題が解決したことから、今後、形状に関する問題を検討していく環境が整ったことになる。

以上の点を踏まえ、ここでは最後に、4 章で行ったと同様、傾斜角度を変えて形状を持った岩塊を、傾斜角度を変えて落下させる実験の予備的検討結果について述べる。

<検討条件>

落下岩塊・・・5 角 12 面体($\phi=0.08\times 80$ 個) 半径 0.45m の球体に相当

落下速度・・・10m/s

斜面傾斜角・・・ 30° , 45° , 60° , 75°

検討方法 初期姿勢を重心周りに 10° 間隔で $0^\circ \sim 90^\circ$ まで回転させる。

図 6.5.7 に、実験モデルを、表 6.5.3 に用いた入力値を示す。なお、 $\Delta t/T=0.048$ である。

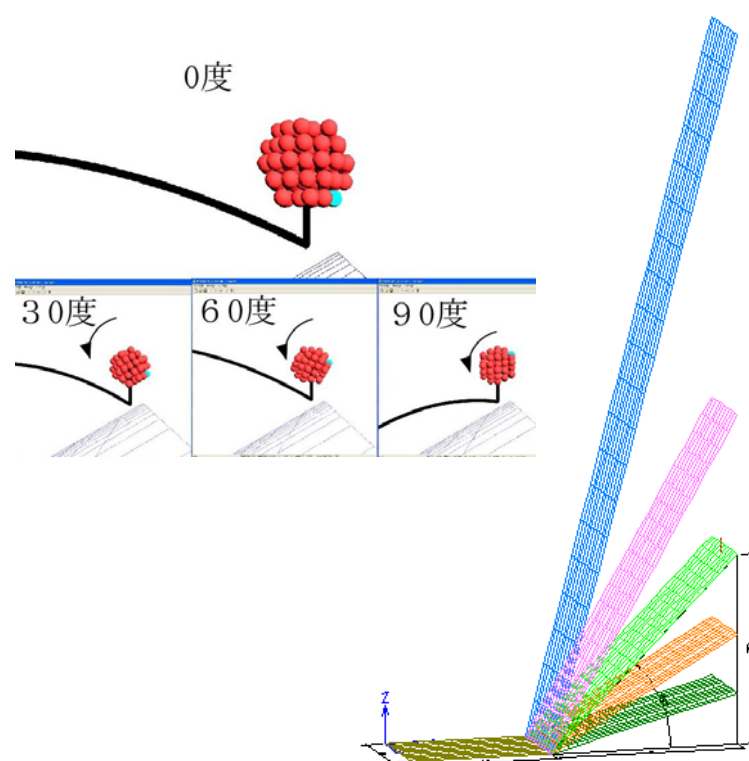


図 6.5.7 形状モデルによる傾斜落下実験

表 6.5.3 形状モデルの入力値

入力項目	入力値
落石質量	446kg($r=0.08 \times 80$ 個)
密度	$2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
摩擦角	30°
$\Delta t(\text{sec})$	0.001
ペナルティバネ (kn)	40000 (kn)

<実験の背景と結果>

実験は、形状の姿勢変化がもたらす軌跡のばらつきを中心にみた。衝突速度は-10m/sである。また、現段階では落下時の回転は考慮していない。

本実験の目的は、岩塊の形状がもたらす軌跡、速度比への影響は、どんな入射角度、入射速度に対しても同じなのか、という点にある。現場で実際の落下現象を観察していると、反射角は、速度比が大きく入射角度が小さいほど、大きくなる傾向がみられる。もちろん、これには衝突地盤での塑性変形の影響も大きい。しかし、もし塑性変形の影響がほとんどない状態で、それでも形状が軌跡に与える影響が入射角度によって異なるなら、計測される R_n にもその影響が含まれることになる。

一方、前節では、単球体であっても、斜面変化角(実質的には入射角度)にばらつきを持たせることで、観察時の軌跡に近づけることが可能となることを示した。しかし、球体にこのようなばらつきを与えることと、形状による影響との間にはどのような関係があるかは、今持って不明である。もし、単球体の入射角度にばらつきを持たせることで、形状効果をも考慮できるのであれば、解析時間が短い単球による法が実務面で圧倒的に有利となる。

本実験は、このような背景をもとに行った。図 6.5.8 にはその予備実験の結果を示す。本結果からは、入射角度が小さいほど、つまり落下時の斜面傾斜が緩いほど反射角は大きく、しかも軌跡もばらつく結果となっている。この結果から、形状によるばらつきは、入射角度が小さいほど大きく表れることがわかる。もし、これが実測であれば、計測される速度比(R_v)はほぼ一定でありながら法線方向速度比(R_n)には大きなばらつきとなって表れることになる。これは、入射角度が大きい場合、すなわち $60^\circ \sim 75^\circ$ の場合も同じである。

詳しくは、今後、入射速度に変化を与え、回転を考慮しつつ検討を加えなければならないが、少なくとも、現段階でも落下岩塊の形状は、速度比は同じであっても法線方向入射速度のばらつきに大きく影響を与えること、その影響は入射角度の小さい方で大きい、などのことがわかる。

このような検討が、本論文における速度比(R_v)とその評価法、そして DDball における基礎(内部)パラメータの研究により可能になりつつある。

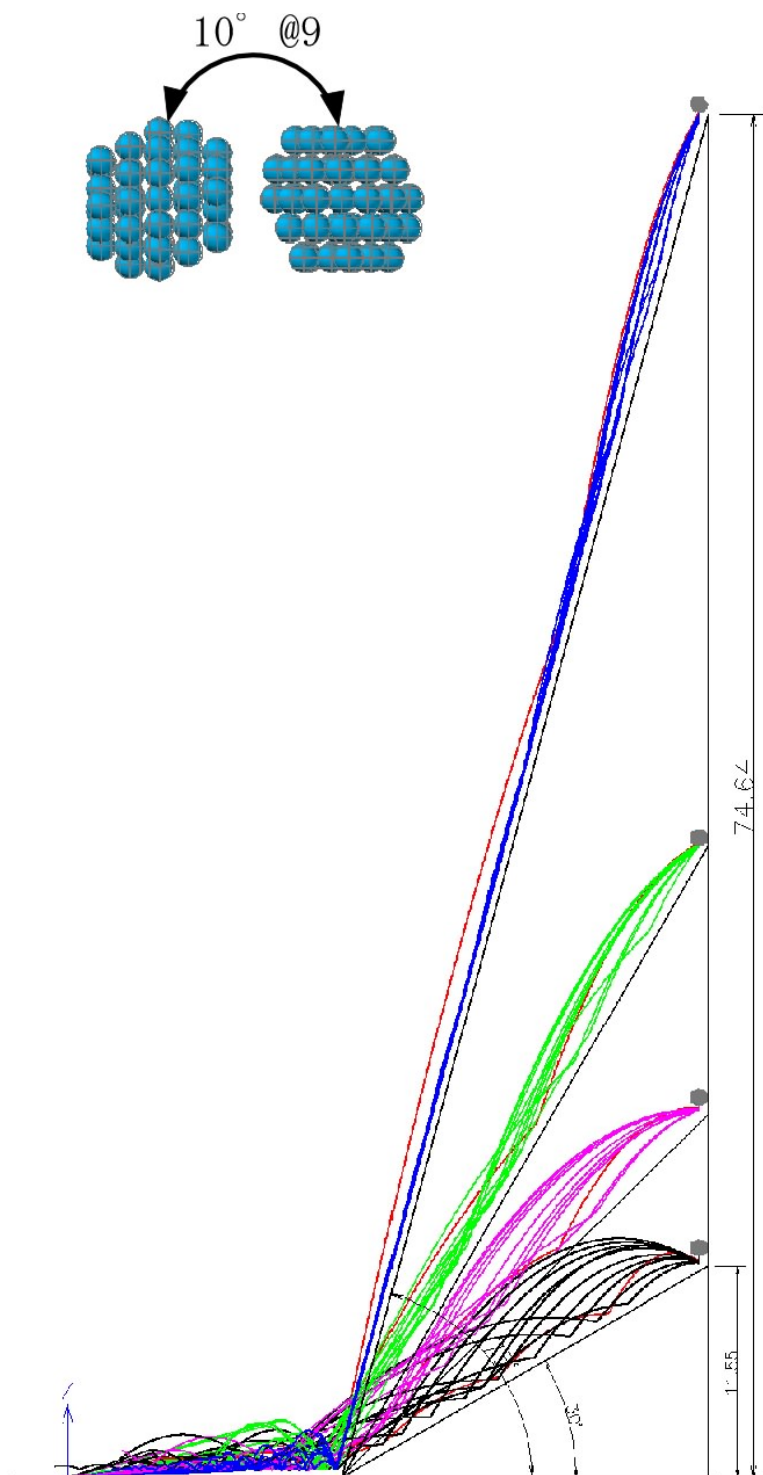


図 6.5.8 衝突角度を変えた場合の形状による反射軌跡への影響
(入射速度一定, 5 角 12 面体の場合)

6.6 まとめと今後の課題

本章では、最初の6.1で、第4章で述べた速度比(R_v)のSF曲線法を三次元剛体球要素法(DDAball)に導入し、実現場への適用性を検証した。

6.2では、SF曲線法を導入したDDAballによるSF曲線の再現解析により、この方法が高い精度で解析可能であることを示した。次に、同じく4章で述べた現場(a)(c)について再現解析を行った。

6.3では、現場実験結果の再現解析を行った。

- ① 現場(a)の再現解析では、3章で問題を提起した、落下経路途中に大きな地形変換点を持つ場合の問題が、速度比(R_v)のSF曲線法を用いることで十分に再現可能であることを示した。すなわち、3章の3.5.3で提起した問題は、法線方向入射速度依存性を考慮したことで解決することが明らかとなった。
- ② 現場(c)の再現解析では、小さな凹凸はあるもののほぼ平均的な傾斜を持つ斜面でも、斜面途中の最大速度領域での速度比計測結果があれば、これをもとに速度比によるSF曲線($R_v(s)$ と補正速度(K))を推定すること可能であり、再現解析が可能となることを示した。

以上より、室内、現場実験ともに、速度比($R_v(s)$)によるSF曲線法を導入したDDAballは、十分に良好な再現解析が可能であることを示した。

6.4では、SF曲線法を導入したDDAballの一般的な適用性を確認する目的で、既公表現場である菌原(1987)と、高松(1987)実験結果に、本手法を適用した。

- ③ 菌原(1973)A,Bの2つの斜面では、1例ずつながら落下開始から終端までの複数箇所での計測記録がある。この記録をもとに速度比(R_v)と法線方向入射速度関係図を作成し、推定したSF曲線を用いれば、いずれの斜面ともに軌跡、速度の再現が可能であることを確認した。
- ④ 高松実験では、既往報告では法線方向速度比(R_n)による検討が中心である。そこで、 R_n の計測結果をを基に、速度比(R_v)を求めてSF曲線を作成し、その結果を用いて再現解析を行った。結果は、おおよそ再現できるものの、ばらつきの程度が実際の軌跡とはややかけ離れた、単調な軌跡を描く結果となった。

一方、6.5では、ばらつきの問題に触れた。落石シミュレーションでは、常に結果の不確実性が問題となる。その原因には、入反射時の速度比や岩塊の形状、地盤の起伏や塑性変形による影響などが考えられているが、その割合や変化の要因などは未だ不明である。今のところは、質点解析を中心に、法線方向速度比(R_n)、摩擦角あるいは斜面角(ラフネス)などの影響については検討されているものの、岩塊の形状や地盤の起伏の影響やそれぞれの設定方法などは全く不明である。

本章では、この点について、高松実験での斜面変化角の影響を考慮した結果と、傾斜を変えた模擬斜面での形状の影響について検討した結果を示した。

- ① 高松実験では、斜面変化角を確率変数とすることで、軌跡の再現性が大きく向上する結果が得られた。これにより、単球の場合には斜面変化角の導入は、再現のための重要なポイントになるものと考えられる。ただし、その設定方法については今後の課題である。
- ② 形状の効果については、その影響が入射角度によって異なることが明らかとなった。ただし、今後は策度や回転の影響と同時に検討していく必要がある。

以上の結果から、斜面の代表的な 2 カ所以上の反発地点で、速度比の計測結果があれば、速度比の SF 曲線を想定することが可能であり、これによる再現、あるいは予測解析が可能となることが明らかとなった。ただし、本方法は、設定する SF 曲線により結果が大きく変化する。斜面の状況に応じた、 $Rv(s)$ 、 K およびそのばらつき範囲などは、今後さらに収集していく必要がある。また、本方法は、速度比が主に入射角度に大きく依存する性質を利用している。このため、斜面の凹凸を含む地形モデルが解析結果へ与える影響も大きいため、地形モデルの作成にあたっては要素の大きさの影響にも注意する必要がある。

第6章 参考文献

- [1]日本道路協会:落石対策便覧に関する参考資料 - 落石シミュレーション手法の調査研究資料-,2002
- [2]島内哲哉：DDAによる落石解析時のばねの設定に関する研究，第28回不連続性岩盤解析実用化研究会，2006.
- [3]島内哲哉，大西有三，西山哲，酒井直樹：衝突時の特性を考慮した不連続変形法の落石シミュレーションへの適用性の研究，土木学会論文集 C,Vol.62,No.3,pp707-721,2006.
- [4]島内哲哉，大西有三，西山哲，中村公一，酒井直樹：速度比の基礎的特性に着目した不連続変形法による三次元落石シミュレーション，土木学会論文集 C, (投稿中)
- [5]島内哲哉，大西有三，西山哲，酒井直樹，中村公一：速度依存性を考慮した DDA による落石シミュレーション，第 35 回岩盤力学シンポジウム講演論文集，pp.83-86,2006.
- [6]小村辰彦，村西隆之，西澤謙二，榊谷浩：落石シミュレーション解析のパラメータと実斜面の凹凸評価，土木学会，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2000.
- [7]右城猛，篠原昌二，谷田幸治，八木則男：落石の斜面衝突運動に関する研究，土木学会，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2000.
- [8]細谷昭悟，中根昌士，松本直樹，氏平増之，樋口澄志：落石の三次元数値シミュレーションに関する研究(続報)－凹凸のある採石場の斜面へ適用した場合－，応用地質，第45巻，第1号，2-12頁，2004.

<空白>

第7章 研究成果に基づく提案と今後の課題

7.1 岩盤崩壊調査と落石防災問題への対応の高度化

本研究では、前半で、岩盤斜面で発生する崩壊や崩落する岩塊、落石の実態、その危険箇所検出のための調査法、着眼点、評価法等についての現状を概観し、経験工学的側面の多い岩盤斜面の評価法を中心に、数値解析法を適用するうえでの問題点を探った。一方、後半ではその結果を踏まえて、落石シミュレーションに関する問題を解決する目的で行った室内および現場実験をまとめ、衝突時の非線形挙動の評価法(SF 曲線法)を提案した。この提案方法を用いて、本研究の前半で解析困難と指摘した地形での落石再現解析を行い、その有効性を確認した。

ここでは、本研究の成果を踏まえ、発生源としての自然岩盤斜面の調査法と崩落、落石に対する被災想定シミュレーションの活用について、提案を行う。

国土の 3/4 以上を山岳地が占める我が国では、道路沿いや人家近傍の危険斜面に対する予防防災を目的とした点検作業が、各機関により続けられている。初期段階での点検結果は、「要対策」「監視」「対策不要」の3つに分けられ、要対策と監視が、詳細調査、継続監視へと移ることになる。

一方、岩盤斜面で発生する崩壊の特徴は、前兆に乏しく突然発生するという点にあり、このことが危険岩塊の抽出や危険度の判定を難しくしている。しかし、その発生エネルギーが大きく、起きてからでは対策が困難であることを考えれば、対策はなるべく発生源で行うべきであることはいうまでもない。しかし、直立した急崖部やオーバーハングが多く、直接踏査が難しい危険な岩盤斜面の調査法にも、ここ数年の間にいくつかの進歩があった。代表的なものとして、次の3つが考えられる。

- (1)急崖高所の斜面における、専門家が観察可能な手段の登場。
- (2)岩盤斜面に刻まれた微地形と不連続面に対する認識の向上。
- (3)簡易な、力学的検討手法の発達。

(1)は、写真やレーザーなどを用いた測量技術の発達を指す。これらの方法は、崖面中に刻みこまれた凹凸(主に崩壊、崩落跡地形)を高精度な三次元情報として記録可能である。これまでは、大きさや価格の面で普及が難しかったが、現在では、レーザー測量器は持ち歩けるまでに小型化が進み、模型ヘリ搭載タイプも登場した。写真測量も、デジタルカメラの高性能かはもちろん、現在ではほとんどのソフトが収斂撮影を扱い、結果も三次元コンピュータグラフィクス(CG)画像として記録が可能となっている。このような支援ツールを調査の早い段階に導入することで、検出精度の向上が期待できる。

(2)は、(1)の進歩により新たな展開が期待できる部分である。(1)の非接触測量法の導入で、従来はスケッチや平面図だけで検討していたものが、全体地形や崖面中の凹凸を、奥行きを踏まえた三次元画像上で角度を変えて詳細に検討することが可能となった。これにより、微地形と不連続面の関係を精度の高い数値データとして記録することも可能となる。むしろ、ここでの問題は、地形と不連続面の関係(多くは崩壊、崩落地形跡)に関する地質学的側面からのアプローチが遅れていることにある。しかし、この点についても、北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落委員会が行った、岩盤崩壊に関する理学的調査[2]がその方向性を示しており、この方面でのさらなる成果が期待される。

いずれにせよ、岩盤斜面では、地形と不連続面によって作られる凹凸が一次情報源である。従来は、1/25000~1/10000 スケールの地形図でしか捉えられなかった岩盤斜面の情報が、これらの技術を同に有することで 1/500~1/200 スケールで議論が可能になる。このことにより判読精度が向上し、以後の登坂調査やボーリング調査はもちろん、監視のポイントについてもより明確になることが期待できる。

一方、(3)は、(1)(2)を踏まえた危険度判定法に関する提案である。判読精度の向上、三次元での検討が可能となったことで、より精度の高い崩壊想定モデルが描けるようになっ

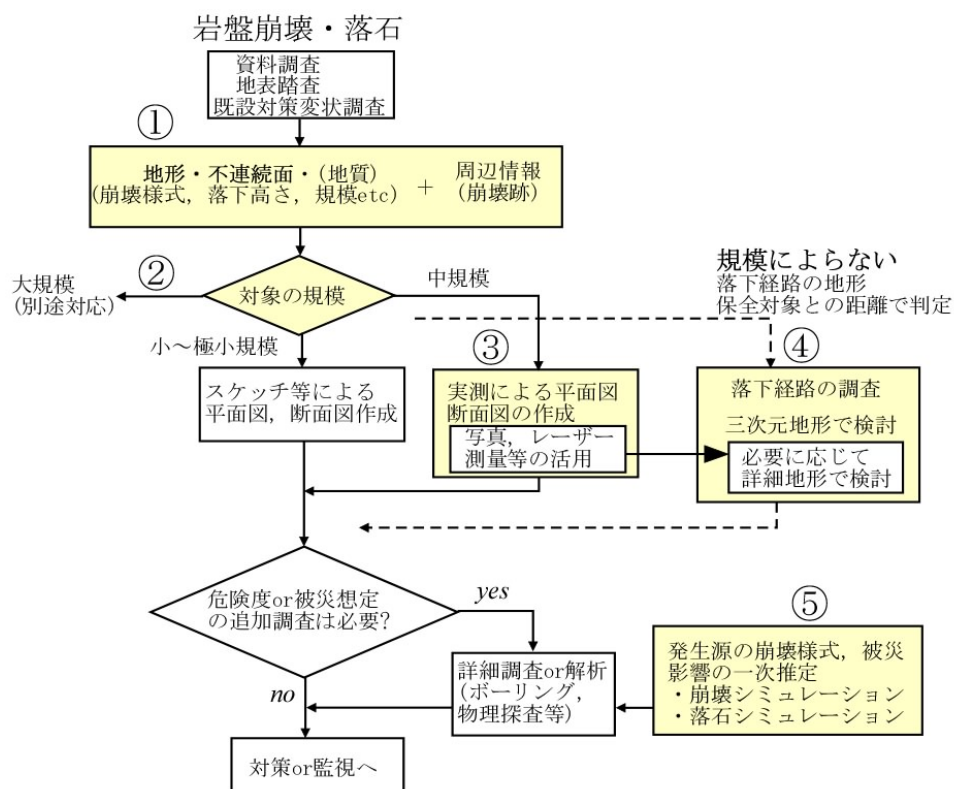


図 7.1 岩盤斜面調査の高度化への提案フロー

た．岩盤斜面上の危険ブロックの規模や形状は，キープロック理論を援用し，地表面の凹凸地形に絡む不連続面を地中に延長することで推定される．このとき，すべての不連続面の存在が明らかであることは少なく，2面あるうちの1面，あるいはトップリングの脚部など，不明瞭な部分がかならず残るのが普通である．このような場合でも，三次元CG記録があれば，新たな不連続面を生成させてブロック形状を試行錯誤で変化させたり，最大危険方向想定断面の抽出も簡単に行える．このような作業を通じて抽出ブロックの重心位置の変化を見るだけでも，危険度評価の資料として十分な場合もあり，対策方法，範囲決定の根拠となる．このとき，考え得る危険性の力学的検討が加わることで，さらに詳細な検討が可能になるものと考えられる．このような検討に際して，不連続体解析は有効である．ただし，安定度の具体的な評価法が今はまだ無いため，今後検討していく必要がある．

図7.1は，以上の点を踏まえて，初期点検後の，詳細調査，継続監視のための調査の手順を文献[1]に追加したものである．．図中，黄色で示した部分が，本研究結果をもとに提案する部分である．以下，図中の①から⑤の記号について，簡単に説明を加えた．

- ①：岩盤斜面の危険度を決定する主要な要因の一つが，地形，不連続面，地質の3つである．これに，周辺で生じている崩壊規模と形態の情報が，危険度判定の重要な情報になる．
- ②：岩盤斜面で発生する崩壊は，発生規模の範囲が広い．なかには，技術的にも経済的にも対応困難な規模のものもある．フローでは，①の情報により規模による対応の可否の判定を加えた．対応が困難な場合には，別途，状況に応じた監視，調査などの判断が必要になる．
- ③：想定される崩壊が，極小規模な場合を除けば，には必要ないが，崖面の規模が高い，あるいは広い場合には，現在の調査の中心であるスケッチや断面測量などの方法では不十分である．特に，崖面中に極小規模岩塊が分散して存在するようなケースでは，正確な情報の有無が判定結果や対策範囲の判定に影響を与える．このためには，レーザーや写真測量による正確な三次元CGによる検討が望ましい．
- ④：想定される災害に崩落や落石が含まれる場合，被災範囲の想定が重要な課題となる．発生源での着目点は，落下岩塊の規模と形状，それに落下高さであり，落下後の運動に対する着目点は，経路の地形と経路中のエネルギー減衰に影響する要素である．落下経路が直線や凸斜面の場合は，広がりも重要である．ここでも，1/1000～1/500スケール程度の等高線図(三次元地形図)があれば，対策工の効果的な空間配置の検討が可能となる．本研究で示したように，三次元的な検討のための実用的ツールは，既にそろっている．
- ⑤：(3)で述べた部分であり，簡易で定性的な幻灯であっても，ブロック相互の挙動を捉えることが可能な不連続体解析の導入は，今後は不可欠なものとなろう．なお，落石シミュレーションについては，次節で述べる．

7.2 落石シミュレーションへの数値解析の適用

本研究の後半では、落下岩塊の被災想定に用いられる落石シミュレーションを扱った。

落石シミュレーションは、現在、質点解析法と非質点解析法(不連続体解析法)の2種類がある。質点解析法は、開発の歴史も古く研究も実績も多いが、モデルが単純な分、実現象で生じているばらつきの設定方法が問題とされる[2][3][5]。また、扱える規模が小さいこともしばしば問題となる[2][4]。これに対し、不連続体解析法は、落石の規模や個数に制限がなく、岩塊形状による不規則な変化をそのまま扱えることから定性的には優れた手法といわれる。しかし、この方法にも、衝突時の非線形モデルの導入、落石形状、現場状況に応じたパラメータの設定法など、さまざまな問題が指摘されている[2][3]。加えて、速度エネルギー比やバネやダッシュポットといった、これまで質点解析法で蓄積してきた係数とは異なる種類の入力値を必要とする。しかも、両者の関係は不明である。また、数値解析法には、時間刻みやペナルティバネなど、その設定が結果を大きく左右するにもかかわらず、設定法が指示されていないパラメータもある。これらが、不連続体解析法の活用局面を広げるうえでの障害の一つになっている。

もっとも、この状況は質点解析法でも変わらず、現状は、路線沿いの複数の斜面間で、保全対象への影響を相対的に比較することは可能であっても、個別の斜面において対策設計に実用できるまでには至っていない。

しかし、一方で、道路や鉄道に隣接する山岳斜面の防災を含む効率的な維持管理を目的としたリスクマネジメントへの期待は高く、リスクを考慮したシナリオに基づく解析ツールとしての期待も高まっている。既に、その考え方や具体的な手法(例えば FTA,ETA など)についての提案もある[6]。

本研究では、前述の不連続体解析法の一つである不連続変形法(DDA)を、少なくとも現在の質点解析と、同等のレベルで実用可能とすることを目的とした。このために、以下の問題を解決した。

- (1) DDA で用いる速度比(R_v)と、質点解析で用いる法線方向速度比(R_n)の、衝突時の非線形挙動を明らかにし、その補正法について提案した。
- (2) 三次元剛体球要素 DDA(DDAball)の、解析時の基本パラメータである質量と時間刻み、ペナルティバネの相互の関係をもとに、その設定法を示した。

以上の結果をもとに、落石現場実験および公表事例現場への再現解析を行い、落石問題特有のばらつきの導入例も含めて、その有効性を示した。

(1)(2)の検討結果をもとに、落石対策便覧で示されるフローのシミュレーション部分に、質点解析法と不連続体解析法(DDAball)の適用区分を加筆したのが図 7.2 である。適用を分ける最も大きな要因は、これまでは規模であった。形状については、6.5 で述べたように、DDAball は、落石形状を球の集合体で表現することが可能である。このような、DDAball を利用する際の解析のフローを図 7.3 にまとめた。本フローに従えば、ほぼ、現在の質点解析と同等の簡易さで、規模や形状に関する問題を気にせず、実務へ適用可能である。

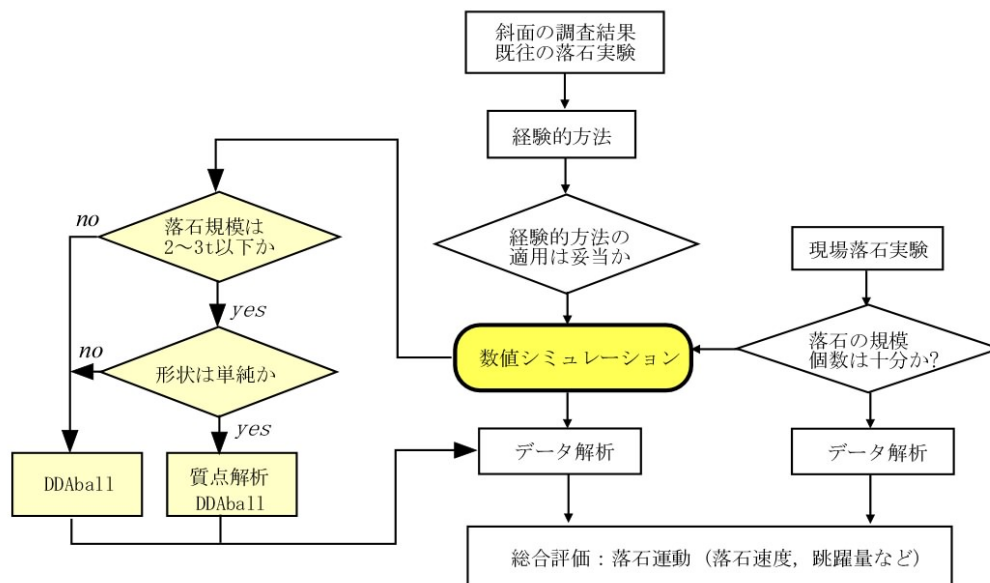


図 7.2 落石シミュレーションの適用 質点解析と DDAball の選択フロー
(落石対策便覧のフローに加筆)

また、今後の展開として、球体での簡易な解析は、GIS での事前検討にも適用可能であり、一方、起伏のばらつきや実際に近い岩塊形状モデルを用いれば、個別の斜面での詳細かつ実用的な検討も可能である。得られる情報の質、量により、方法を使い分けることが可能なのが、本手法の利点でもある。

ただし、落石シミュレーションに対する共通の問題として、複雑な地形と落石形状の単純化はどこまで許されるか、現場の斜面特性を反映した入力値の設定法は、また立木の影響の考慮法、必要とする安全率、そして試行解析の多い落石シミュレーション結果評価のための基本的な考え方の整理などを、今後解決していく必要がある。そのなかで、不連続体解析法の形状や規模に対する利点を活かすためには、法線方向速度比(R_n)の利用を可能にして質点解析法との互換性を高めることも必要となろう。

岩盤崩落や落石問題は、その現象の複雑さ故に経験工学的であるといわれるが、今後もシミュレーション技術を活かした事例研究を増やし、問題を定量化していくことが上記の課題の解決と、被災予測の信頼性向上に不可欠と考える。

最後になるが、現在、崩壊や落石などのシミュレーションが、被災予測と対策計画の合理的な裏付けという本来の目的とは少しだけ逸れ、地元住民や利用者への説明責任のための資料として使われるケースも増えている。現在は、解析結果をもとに汎用アニメーションソフトで対応しているが、今後はこの種のシミュレーションにも表現力が問われることになる。図 7.4 には、3 章で行った北浜の例を、また図 7.5 には、5 章で行った現場(c)について、アニメーションソフトによる例を示す。

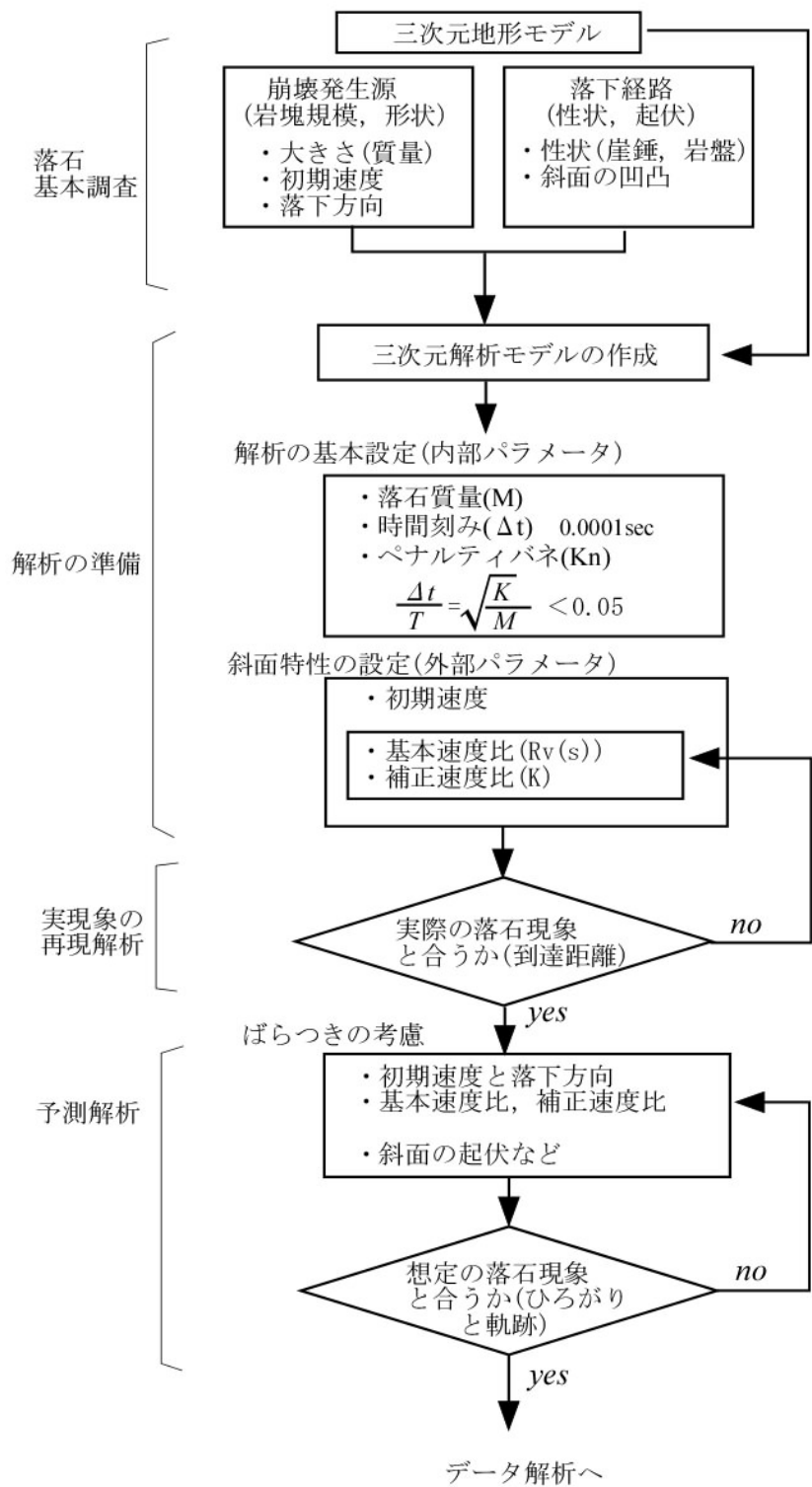


図 7.3 DDAball の落石解析への適用

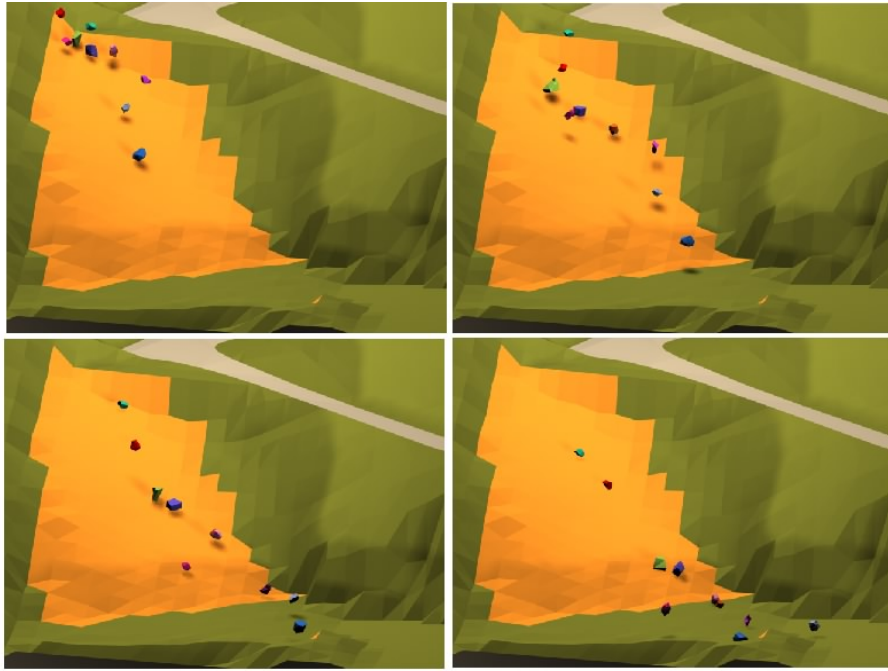


図 7.4 現場(c)の落石アニメーション(岩塊に陰がつけられるためリアルに表現できる)

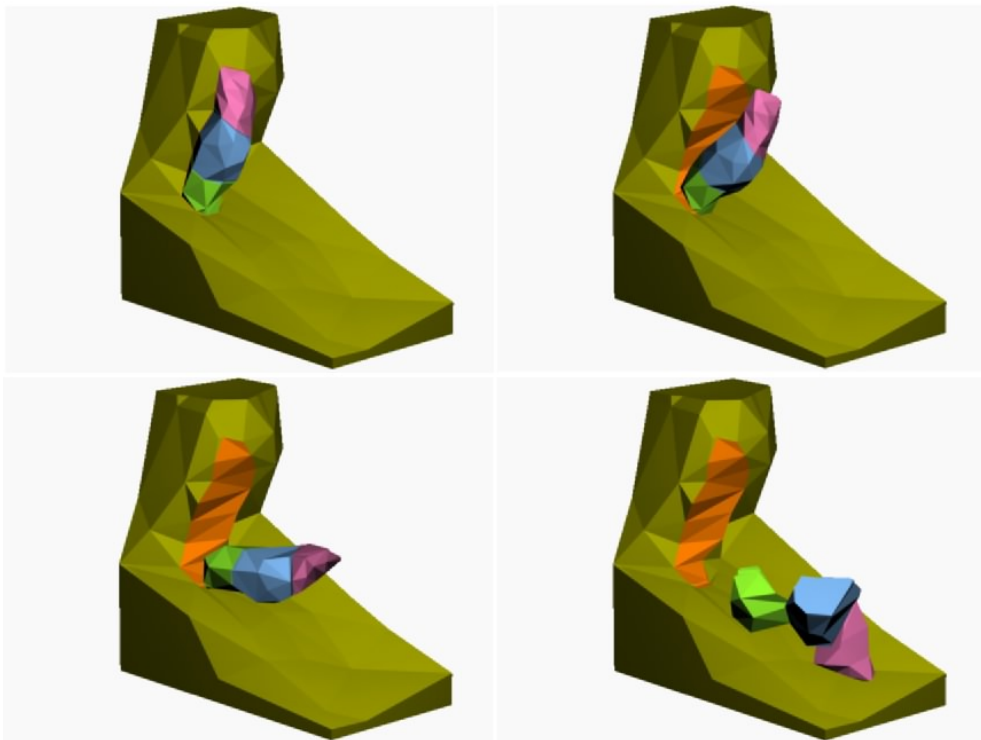


図 7.5 3 章 北浜岩盤崩壊のアニメーション(岩塊に陰や配色が可能)

<空白>

第7章 参考文献

- [1]平成8年度，道路防災点検要領(豪雨・豪雪等)，(財)道路保全センター
- [2]日本道路協会:落石対策便覧に関する参考資料 - 落石シミュレーション手法の調査研究資料-,2002
- [3]松尾修：落石シミュレーションの現状と今後の課題，第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.267-273, 2002.
- [4]土木学会：岩盤崩壊の考え方・現状と将来展望-[実務者の手引き](CD-ROM 版)，2004
- [5](独)土木研究所：GIS を活用した道路斜面のリスク評価に関する共同研究報告書，道路斜面ハザードマップ作成要領，2004.
- [6]大津宏康，大西有三，伊東利和，竹山雄一郎，西山哲：不連続面の空間分布特性に着目した斜面崩壊に伴う社会的損失推定，土木学会論文集 No.736/Ⅲ-63, pp.231-248, 2003.

<空白>

第8章 本研究のまとめ

国土の3/4が山岳地を占める我が国では、その山腹斜面の岩盤露頭を発生源とする崩落、落石災害がしばしば発生し、時に人的被害を及ぼす。一つ一つの災害規模は、極小規模であるが、その危険が想定される範囲は広く、ほぼ日本全国に及ぶ。このような待ち受け型とも呼ばれる災害では、発生箇所の発生危険度評価はもちろんであるが、その被災想定範囲を可能な限り正確に把握することが、経済的で信頼性の高い対策計画のために必要である。現在、この被災想定には、経験法や質点系のシミュレーションが用いられるが、前者には複雑な落下経路に対応できず、後者にも、岩塊の形状や規模による制約が指摘されている。一方、これらを解決するうえで不連続変形法(DDA)のような数値解析法の導入が期待されているが、現場に応じた適切な入力値の設定法、数値解析特有の内部パラメータの設定法などが明らかにされておらず、実用化という面で遅れていた。

本研究は、このような背景をもとに、①現場実験、室内実験を通じて、落石の速度と軌跡に大きな影響を与える速度比の非線形挙動を明らかにし、その性質を考慮した関数曲線による速度比の推定法(SF 曲線法)を提案した。また、②不連続変形法(DDA)の内部パラメータについて、その安定性に関する検証解析を通じて、その設定法を提案した。そして、これらの結果をもとに、③現場実験、および公表されている既往現場実験の再現解析を通じて、提案手法が十分に実用的であることを検証した。

以下、本研究の成果をまとめる。

第1章では、本研究の背景となった、岩盤斜面を発生源とする災害の特徴と課題について整理した。

第2章では、大規模なものから小規模なものまで幅広く存在する岩盤崩壊のさまざまなタイプを紹介し、なかでも、中小規模露頭を発生源とする岩塊の崩落、落石災害に対する、発生源予測と被災予測が、頻度の点からも分布の広さからも重要であることを述べた。また、崩壊の素因と誘因、規模と発生頻度などの特徴についての現在の知見をまとめ、素因である地形と不連続面の情報に着目した新しい調査法について述べた。

ただし、崖斜面中の危険な部位を特定し、評価することは今でも難しく、レーザーや写真を用いた測定の発達によって、ようやく評価のための情報が収集できるようになった段階にある。本研究では、写真測量を用いて、落下岩塊や旧崩壊跡の規模から想定されるブロックサイズが、危険な部位検出の一つの目安となる可能性を示した。

一方、崩壊による被災想定は、今でもその規模によらず経験法が中心である。シミュレーションの導入も期待されているが、これにも斜面状況に応じた計算パラメータの設定法や、現場斜面や落石のモデル化などの問題が山積していることを述べた。

第3章では、最初に、岩盤崩壊に適用される解析手法の種類を紹介し、岩盤崩落、落石現象解析に用いられる、質点系解析法と不連続体解析法について述べた。また、その代表的解析法の一つである不連続変形法(DDA)の基礎理論を説明し、本手法を行ううえで必要となる物性値の調査と試験方法について述べた。

現段階では質点、不連続体解析法ともに、多くの問題点を抱えているが、岩塊の形状を扱えるという点で不連続体解析法は、質点解析法に比べて優れている。しかし、不連続体解析法にも、エネルギー損失評価のためのパラメータが質点系解析で蓄積されてきたパラメータとは異なること、また安定かつ精度の良い解析を行うための内部パラメータの設定法が確立されていないなどの問題を抱えている。また、DDAの落石シミュレーションへの適用を目的として行った予備検討では、エネルギー損失評価に用いる速度エネルギー比だけでなく、質点系解析で用いる法線方向速度比(R_n)にも、入射速度や入射角度に依存する性質があり、しかもその詳細が明らかになっていないことがわかった。

第4章では、第3章の検討結果を基に、速度エネルギー比(速度自乗比)の性質を調べる目的で行った現場実験と室内実験の結果をまとめた。我が国でもこれまでに多くの現場、室内実験が行われているが、これまでの実験には、反発現象の特性を中心に扱った報告が少ない。本研究では、現場実験、室内実験ともに、異なる入射角度、入射速度で衝突する岩塊の、速度比の変化を中心に調べた。

その結果、速度比(R_v)の、①入射角度の減少とともに値が大きく減少する、②速度が速くなると同様に値が減少する、という性質を明らかにした。また、比較した法線方向速度比(R_n)との性質の違いから、速度比(R_v)は斜面の特性値としては適切でないことを示し、速度比(R_v)を法線方向入射速度の関数とする方法(SF 曲線法)を提案した。

なお、現場実験と室内実験結果との比較から、現場実験には岩塊形状や地盤変形、それに衝突斜面の小起伏などによる、多くのばらつきが含まれる。以後の解析では、軌跡や反射速度への速度比(R_v)の影響を正確に評価するために、落石モデルに球体を用いることとした。

第5章では、落石問題に数値解析を適用する際に問題となる、時間刻み、ペナルティバネなど、解析内部のパラメータ設定法を提案した。近年、数値解析の動的問題では、設定する内部パラメータによっては、大きな数値減衰を生じることが指摘されている。落石や岩塊の崩落現象解析は、エネルギー損失そのものの評価であることから、想定外の数値減衰は避けなければならない。本章では、本研究で用いた三次元剛体球不連続変形法(DDAball)を用いて、内部パラメータの速度と角度に対する性質と、衝突時に生じる減衰影響を最小限に留める設定法について検討を行い、布川が提案した方法により改善可能であることを検証した。この結果をもとに、DDAballを落石解析に用いる際の内部パラメー

タ(質量, 時間刻み, ペナルティバネ)の設定方法について提案した.

第 6 章では, 4 章で提案した速度比の非線形挙動を考慮した SF 曲線法を, DDAball に導入して SF 曲線の再現解析を行い, 5 章で提案した内部パラメータの設定法による効果を検証した. その結果, 提案した設定法により, さまざまな角度と速度で衝突する球体に対し, 安定した高い精度の解が得られることを示した.

一方, 4 章で行った現場実験結果と, 公表されている 2 つの現場の計 4 箇所の現場において再現解析を行った. 本結果から, 速度, 軌跡ともに, 適切な速度比の SF 曲線法を適用すれば, 良好な再現解析結果が得られることを示した.

ただし, 本提案法により, 速度比そのものの評価は可能となったが, 実際の斜面では, 岩塊の形状や地盤の小起伏, 衝突時の塑性変形によるばらつきも多い. DDA の落石シミュレーションにおいても, 今後は, このようなばらつきを考慮していく必要がある. 本章では最後に, 単球を用いて入射角を確率変数としばらつきを評価する方法と, 岩塊形状が入射角度に与えるばらつきの大きさを評価するための予備実験結果を示した. いずれも, 現段階では結果に与える影響の大きさ, ばらつきの設定方法は明らかになっておらず, 今後の大きな課題といえる.

第 7 章では, 本研究結果をもとにした 2 つの提案を行った.

2 章, 3 章での研究成果から, 崩落, 落石発生源となる岩盤斜面の調査法の高度化について提案した. 従来, 急崖を目前にして, 下から眺める他なかった調査法も, 近年では写真やレーザーを用いた測量技術と CG 技術の発達で, 立体図をもとにさまざまな角度からの検討が可能になっている. また, その精度の高さから, 崖面の凹凸(地形)と不連続面との関係を数値データで把握することも可能である. ハザードマップ的な管理手法として考えられている GIS も, 現段階では地形を等高線情報としているが, 岩盤斜面は急崖でありオーバーハングも存在する. この面からも, 三次元 CAD/CG の導入と経験の組み合わせが, 岩盤斜面の防災調査・対策には不可欠と考えられる.

4 章, 5 章, 6 章での成果をもとに, 現在は質点解析が中心である落石シミュレーションのフローに, 数値解析法である DDAball の適用を提案した. 岩盤斜面を発生源とする崩落岩塊, 落石は規模も形状もさまざまである. これまでの質点解析では, 規模の大きい崩壊岩塊では検討が困難であった. しかし, DDAball は, 規模によらず三次元での検討が可能であり, 形状の考慮も可能である. 従来から指摘の多かった, 内部パラメータの設定方法にも見通しがつき, 汎用的な落石シミュレーション手法としての実用性は大きく向上したものとする.

研 究 実 績

1 査読付き論文

- 1-1) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 中村公一, 酒井直樹: 速度比の基礎的性質に着目した不連続変形法による三次元落石シミュレーション, 土木学会論文集 C, (投稿中)
- 1-2) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹: 衝突時の特性を考慮した不連続変形法の落石シミュレーションへの適用性に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.62, pp707-721,2006,9.
- 1-3) T.Shimauchi,N.Sakai,Y.Ohnishi and S.Nishiyama : Safety assessment of rock slope by discontinuous analyses considering impact angle, Proc of the ISRM international Symposium 3Rd ARMS, pp1239-1242,2004,12.
- 1-4) 中村公一, 豊田浩史, 酒井直樹, 島内哲哉: 孔内ねじりせん断試験のせん断破壊特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp373-378,2004.6.
- 1-5) Tetsuya Shimauchi, Naoki Sakai and Yuzo Ohnishi : Fundamental Study of Mechanical Behaviors For RockFalls Based on imaging Analysis, Proc of the ICADD-4, pp.473-482,2001,6.

2.講演会, 研究会での発表, 投稿論文

- 2-1) 島内哲哉, 鄭惟, 中村公一, 西山哲, 大西有三: DDA 落石シミュレーションに用いる速度エネルギー比の基礎的特性に関する研究, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp153-158,2007,1.
- 2-2) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲: DDA によるシミュレーションにおける衝突時係数の設定法に関する検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp393-394, 2006,9.
- 2-3) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 中村公一: 落石シミュレーションに用いる速度エネルギー比の速度依存性に関する検討, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp2241-2242, 2006,7.
- 2-4) 島内哲哉, 清水順二, 中村公一, 大西有三, 西山哲: 3D-DDA による北浜岩盤・転倒崩壊機構の検討, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp79-82,2006,1.
- 2-5) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹, 中村公一: 速度依存を考慮した DDA による落石シミュレーション, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp83-86,2006,1.
- 2-6) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹: 衝突時係数の入射速度, 角度による依存性を考慮した不連続変形法(DDA)による落石シミュレーション, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp349-350,2005,9.
- 2-7) 島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三, 西山哲: 落石シミュレーションに用いるパラメータ

- の速度依存効果に関する検討，第 40 回地盤工学研究発表会，pp2465-2466,2005,7.
- 2-8) 島内哲哉，大西有三，西山哲，酒井直樹：岩盤崩落，落石シミュレーションに用いる入力パラメータの特性に関する研究，応用地質学会，平成 16 年度研究発表会講演論文集，255-258,2004,10.
- 2-9) 島内哲哉，酒井直樹，大西有三，西山哲：衝突角度を考慮した不連続体解析法による岩盤切土時の安全性評価，計算工学講演論文集，Vol.9, 2004,5.
- 2-10) 島内哲哉，酒井直樹，大西有三：衝突角度の違いが落石解析結果に与える影響，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp337-342, 2004,1.
- 2-11) 島内哲哉，酒井直樹，大西有三：ビデオ解析に基づく落石挙動の基礎的研究，第 35 回地盤工学研究発表会，pp2499-2500, 2000,6.
- 2-12) 島内哲哉，中井卓巳：不連続性岩盤の調査・解析と評価，3.不連続面の調査と評価(その 2)，土と基礎，pp55-60,2000,3.
- 2-13) 中井卓巳，島内哲哉：不連続性岩盤の調査・解析と評価，3.不連続面の調査と評価(その 1)，土と基礎，pp57-62,2000,1.

3.その他の発表，講演，論文等

- 3-1) 藤森克也，功力忠昭，望月優，赤松太，島内哲哉，酒井直樹：急崖上部に位置する崩落危険岩塊の調査と評価，応用地質学会，平成 16 年度研究発表会講演論文集，pp181-184,2005,10.
- 3-2) 酒井直樹，島内哲哉，豊田浩史，中村公一：中越地震による表層斜面崩壊メカニズムに関する解析的検討，第 60 回土木学会年次学術講演会，pp351-352,2005,9.
- 3-3) 酒井直樹，島内哲哉，豊田浩史，中村公一：不攪乱試料における含水状態を考慮したせん断強度に関する実験的検討，第 40 回地盤工学研究発表会，pp2395-2396,2005,7.
- 3-4) 清水順二，島内哲哉：北浜岩盤・転倒崩壊の発生機構に関する考察，平成 17 年度，日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会合同発表会，2005.6.
- 3-5) 有賀誠，三上芳正，納谷宏，島内哲哉，酒井直樹，星川光弘，今 博克：岩盤斜面における写真測定の適用性に関する研究，第 16 回地すべり学会発表講演論文集，pp399-pp402,2004.9
- 3-6) 星川光弘，今博克，溝上雅宏，三上芳正，小板橋重一，島内哲哉，納谷宏：急崖斜面における不安定岩塊の定性・定量的評価例，平成 16 年度，日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会合同発表会，2004.4.
- 3-7) 川井武志，石井正之，英弘，三上芳正，小板橋重一，関口尚志，島内哲哉，鄭惟：三次元安定解析における地下水面の決定方法について，地すべり学会北海道支部研究発表会予稿集，pp55-58,2004,4.
- 3-8) 川井武志，島内哲哉，石井正之，英弘，三上芳正，小板橋重一，納谷宏：地すべり地におけるトンネル計画への三次元安定解析の適用性，日本地すべり学会北海道支部研

究発表会予稿集, pp52-55,2003,4.

書籍および共著

- 3-1) 土木学会「岩盤斜面の調査と対策」, 2.1 岩盤斜面の調査・試験の流れ, 2.2 調査, 試験計画の着眼点 pp19～32,1999,10.
- 3-2) 土木学会「岩盤崩壊の考え方-現状と将来展望-」, 2.全体のフロー, 5.解析手法とモデリング, 2004,3.